

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ

SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING

ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ENGINEERING

ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

DIONYSSOS SATELITE OBSERVATORY

ΤΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ

ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ ΠΑΥΛΙΔΟΥ



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ

SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING

ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ENGINEERING

ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

DIONYSSOS SATELITE OBSERVATORY

CALCULATING A LOCAL GEOID MODEL USING DIFFERENT MEASURING METHODS

ANDRONIKI PAVLIDOU



ATHENS, JULY 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μελέτη και ο προσδιορισμός του γεωειδούς είναι ένα αντικείμενο που απασχολεί κυρίως την επιστημονική κοινότητα της γεωδαισίας. Η γνώση των κυματισμών γεωειδούς σε σχέση με κάποια επιφάνεια αναφοράς είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός της μορφής της γης, καθώς αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο της Ανώτερης Δορυφορικής Γεωδαισίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός μοντέλου γεωειδούς τοπικής κλίμακας, με μετρήσεις GPS, βαρύτητας και υψομετρίας. Το μοντέλο αυτό αφορά την περιοχή του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου, Αττικής και δημιουργήθηκε με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα δημιουργίας του και την ακρίβεια υπολογισμού του, καθώς και την ύπαρξη τυχόν διακυμάνσεων που παρουσιάζει το γεωειδές σε μία περιορισμένη έκταση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Παραδείση Δημήτριο, ο οποίος έδωσε τις κατευθυντήριες γραμμές για το επιστημονικό περιεχόμενο της εργασίας, ανέγνωσε τμήματα του κειμένου, υπέδειξε παραλήψεις και έκανε χρήσιμες διορθώσεις.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Ζαχαρή Βαγγέλη και ιδίως στον κ. Γαλάνη Ιορδάνη για τη συνεχή και αμέριστη βοήθειά του, τις συμβουλές και υποδείξεις του, καθώς επίσης και για την επιστημονική και ηθική συμπαράστασή του κατά τη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που υπομονετικά μου παρίσταται σε κάθε μου βήμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xiii
ABSTRACT	xv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xvii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	3
1.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ	3
1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	5
2.1 ΓΕΩΕΙΔΕΣ ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	7
2.2 ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΕΣ ΕΚ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	8
2.3 ΣΦΑΙΡΑ	9
2.4 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	10
2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	10
2.5.1 ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	11
2.5.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WGS 84	12
2.5.3 ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ITRF 2014	13
2.6 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1987	15
2.6.1 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΕΙΔΕΣ ΚΑΙ ΥΨΟΜΕΤΡΑ	17
3.1 ΣΧΕΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ	17
3.1.1 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ	17
3.1.2 ΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ N	18
3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	21
3.2.1 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EGM96	23
3.2.2 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EGM08	24
3.2.3 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EIGEN-6C4	25
3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΑΡΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΓΕΩΕΙΔΕΣ	27
4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ GPS ΣΤΙΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	31
5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ GPS	31

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GPS	32
5.3 ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΣΤΟ GPS	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	35
6.1 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	35
6.1.1 ΙΔΡΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	36
6.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	38
6.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ	38
6.2.2 GPS.....	40
6.2.3 ΒΑΡΥΤΗΤΑ.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	51
7.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ	51
7.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	53
7.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ	58
7.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS.....	63
7.4.1 IGS Antenna Working Group	64
7.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ GPS	72
7.6 ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΛΥΣΗ GPS	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΠΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	77
8.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΔΔ	77
8.2 ΤΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΔΔ	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
9.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ	91
9.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	92
9.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ – ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ	92
9.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ GPS.....	92
9.2.3 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ – ΓΕΩΕΙΔΕΣ	92
9.2.4 ΤΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	98

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Θέσεις και αριθμός των μόνιμων σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ITRF2014 [Πηγή: http://www.igs.org]	14
Εικόνα 2: Δεδομένα δημιουργίας του ITRF2014 [Πηγή: http://www.igs.org]	14
Εικόνα 3: Γεωδαιτικές επιφάνειες αναφοράς [Πηγή: eclass.uoa.gr ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ_ΧΡΟΝΟΥ_ΚΟΣΜΑΣ_ΓΑΖΕΑΣ_2017]	18
Εικόνα 4: Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων [Βέης Γ., κ.α., 2007]	18
Εικόνα 5: Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM96 [Πηγή: http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html]	23
Εικόνα 6: Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM08 [Πηγή: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JB008916]	24
Εικόνα 7: Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EIGEN -6C4 [Πηγή: http://icgem.gfz-potsdam.de/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf]	25
Εικόνα 8: Μέτρηση της βαρύτητας μέσω της παραμόρφωσης ενός ελατηρίου [Πηγή: Δ. Δεληκαράογλου 2007]	28
Εικόνα 9: Λειτουργία βαρυτόμετρου (Α)	29
Εικόνα 10: Λειτουργία βαρυτόμετρου (Β)	29
Εικόνα 11: Περιοχή μελέτης (Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου)	35
Εικόνα 12: Υλοποιημένα σημεία εδάφους	36
Εικόνα 13: Υπάρχουσες υψομετρικές αφετηρίες (Reper)	37
Εικόνα 14: Πρότυπη απεικόνιση υψομετρικής αφετηρίας	37
Εικόνα 15: Διαδρομή γεωμετρικής χωροστάθμησης	39
Εικόνα 16: Διαδρομές γεωμετρικής χωροστάθμησης	39
Εικόνα 17: Πρότυπη γεωμετρία μέτρησης/αναγωγής ύψους κεραίας (Πηγή: GPS for Land Surveyors https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1853)	41
Εικόνα 18: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Trimble 4000ssi	42
Εικόνα 19: Κεραία και δέκτης της σειράς: Trimble 4000ssi	42
Εικόνα 20: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Trimble 4700	43
Εικόνα 21: Κεραία και δέκτης της σειράς: Trimble 4700	43
Εικόνα 22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Javad	44
Εικόνα 23: Κεραία και δέκτης Javad	44
Εικόνα 24: Δίκτυο GPS	45
Εικόνα 25: Δίκτυο GPS	46
Εικόνα 26: Δίκτυο GPS	46
Εικόνα 27: Όργανο μέτρησης της βαρύτητας (βαρυτόμετρο/βαρυτήμετρο)	48
Εικόνα 28: Μέτρηση βαρύτητας σε κλειστούς βρόχους	49
Εικόνα 29: Μέτρηση βαρύτητας σε κλειστούς βρόχους	49
Εικόνα 30: Μορφή αρχείου RINEX	52
Εικόνα 31: Αποθηκευμένο αρχείο του βαρυτόμετρου (αρχείο μετρήσεων)	54
Εικόνα 32: Αποτελέσματα μετρήσεων βαρύτητας στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου	58
Εικόνα 33: Εισαγωγή κεραιών μέτρησης στο GNSS Solutions	64
Εικόνα 34: Εισαγωγή των Καρτεσιανών συντεταγμένων του γνωστού/σταθερού σημείου DYNG	65
Εικόνα 35: Βάσεις με σημαντικά σφάλματα (ΔX , ΔY , ΔZ)	68

Εικόνα 36: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου με συνδυασμό των μετρημένων βάσεων	69
Εικόνα 37: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου με ακτινική λύση των βάσεων ως προς το DYNG	71
Εικόνα 38: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου στο GNSS	72
Εικόνα 39: Μοντέλο EGM96 για το ΚΚΔ	77
Εικόνα 40: Μοντέλο EGM2008 για το ΚΔΔ	78
Εικόνα 41: Μοντέλο EIGEN -6C4 για το ΚΔΔ	78
Εικόνα 42: Μοντέλο γεωειδούς EIGEN-6C4 για τον Ελλαδικό χώρο	79
Εικόνα 43: Μοντέλο γεωειδούς EGM2008 για τον Ελλαδικό χώρο.....	80
Εικόνα 44: Μοντέλο γεωειδούς EGM2008 της υπό μελέτη περιοχής	81
Εικόνα 45: Τοπικό μοντέλου γεωειδούς για το ΚΔΔ	83
Εικόνα 46: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής	83
Εικόνα 47: Τοπικό μοντέλο γεωειδούς για το ΚΔΔ, χωρίς τα σημεία DIONA και SR5 ..	85
Εικόνα 48: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία DIONA και SR5	85
Εικόνα 49: Τοπικό μοντέλου γεωειδούς για το ΚΔΔ, χωρίς τα σημεία SR1 και M	87
Εικόνα 50: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία SR1 και M	87
Εικόνα 51: Τοπικό μοντέλο γεωειδούς για το ΚΔΔ, χωρίς τα σημεία SR1, SR5 και M ..	88
Εικόνα 52: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία SR1, SR5 και M	88
Εικόνα 53: Μοντέλο τοπογραφίας (πάνω 3D σχήμα) – Μοντέλο γεωειδούς (κάτω 3D σχήμα)	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τεχνικές προδιαγραφές βαρυτόμετρου SCINTREX CG- 5	48
Πίνακας 2: Συνορθωμένες τιμές βαρύτητας	56
Πίνακας 3: Βαρυτομετρικά διορθωμένες υψομετρικές διαφορές σημείων εδάφους.....	59
Πίνακας 4: Συνορθωμένες υψομετρικές διαφορές σημείων εδάφους.....	59
Πίνακας 5: Πίνακας υπολοίπων (1 ^η συνόρθωση)	60
Πίνακας 6: Βελτιστοποιημένες τιμές των υψομετρικών διαφορών των σημείων εδάφους (2 ^η συνόρθωση)	61
Πίνακας 7: Πίνακας υπολοίπων (2 ^η συνόρθωση)	61
Πίνακας 8: Ορθομετρικά υψόμετρα σημείων εδάφους.....	62
Πίνακας 9: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (συνδυαστική επίλυση) ...	68
Πίνακας 10: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (ακτινική επίλυση ως προς το DYNB).....	70
Πίνακας 11: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (GNSS adjustment).....	71
Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων: all baselines – ακτινικής επίλυσης (DYNB)....	73
Πίνακας 13: Σύγκριση αποτελεσμάτων: all baselines – GNSS adjustment.....	73
Πίνακας 14: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (τελικές)	74
Πίνακας 15: Γεωκεντρικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου	75
Πίνακας 16: Υψόμετρα γεωειδούς σημείων εδάφους	82
Πίνακας 17: Σύγκριση τοπικού μοντέλου γεωειδούς με τα μοντέλα της ΓΥΣ, EGM96, EGM2008 και EIGEN-6C4	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΟΝΥΜΙΩΝ

ΓΥΣ Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού

ΕΓΣΑ'87 Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς '87

ΕΕΠ Ελλειψοειδές Εκ Περιστροφής

MET Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

Μσθ Μέση στάθμη θάλασσας

ΣΑ Σύστημα Αναφοράς

ΦΓΕ Φυσική Γήινη Επιφάνεια

EGM Earth Gravitational Model

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

ITRF International Terrestrial Reference Frame

ITRS International Terrestrial Reference System

RINEX Receiver Independent Exchange Format

WGS World Geodetic System

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός τοπικού μοντέλου γεωειδούς για την περιοχή του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου, Αττικής. Προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία του εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι μετρήσεων, μετρήσεις GPS, βαρύτητας, καθώς και μετρήσεις υψομετρίας (γεωμετρική χωροστάθμηση), ώστε να συγκεντρωθεί η απαιτούμενη υψομετρική πληροφορία για τη δημιουργία του μοντέλου.

Ο σκοπός για τον οποίο γίνεται η εφαρμογή των μεθόδων αυτών είναι για να ελεγχθεί αν στην υπό μελέτη περιοχή, που δεν ξεπερνά σε έκταση τα 32 στρέμματα είναι εφικτός ο ικανοποιητικός υπολογισμός του γεωειδούς ή/και ο εντοπισμός διακυμάνσεών του.

Εφόσον μελετήθηκε η υπό μελέτη περιοχή, επιδιώχθηκε η οριοθέτησή της μέσω της ίδρυσης ενός δικτύου ελέγχου δεκατεσσάρων (14) κορυφών, οι οποίες υλοποιήθηκαν στο έδαφος. Η επιλογή των θέσεων των σημείων εδάφους έγινε με γνώμονα την ομοιόμορφη κάλυψη της περιοχής, με σκοπό την αποφυγή ελλιπούς πληροφορίας για κάποιο τμήμα της. Τα σημεία αυτά αποτέλεσαν τις στάσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βαρύτητας, GPS και χωροστάθμησης, οι οποίες ολοκληρώθηκαν στη διάρκεια δύο μηνών.

Οι πρωτογενείς μετρήσεις που έλαβαν χώρο στο πεδίο ελέγχου επεξεργάστηκαν στη συνέχεια προκειμένου να εξαχθούν οι πληροφορίες που αφορούν την υψομετρία της περιοχής (ορθομετρικά και γεωμετρικά υψόμετρα). Αναλυτικότερα πρώτο στάδιο της επεξεργασίας αποτέλεσε η ανάλυση των μετρήσεων βαρύτητας, οι οποίες συνορθώθηκαν μέσω της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου, προκειμένου να προσδιοριστούν οι καλύτερες τιμές τους, που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση των μετρήσεων υψομετρίας (ΔΗ χωροστάθμησης). Παρά τη μη σημαντική έκταση της περιοχής, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η διόρθωση των ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών που μετρήθηκαν κατά τη διαδικασία της χωροστάθμησης, ώστε να ελεγχθεί αν είναι σημαντική ή μη η επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Από τα παραπάνω προέκυψαν τα ορθομετρικά υψόμετρα των κορυφών του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του τοπικού μοντέλου γεωειδούς.

Τέλος, επεξεργάστηκαν τα δεδομένα των μετρήσεων GPS με σκοπό τον, κατά τον δυνατό, ακριβή εντοπισμό των σημείων εδάφους (X, Y, Z – φ, λ, h), στο σύστημα αναφοράς του WGS84.

Εφόσον ολοκληρώθηκε το στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων που παράχθηκαν κατά τις εργασίες πεδίου, ακολούθησε ο προσδιορισμός του ζητούμενου μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής. Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε στο λογισμικό Surfer, μέσω του οποίου οπτικοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των επεξεργασμένων

δεδομένων. Στο πρόγραμμα έγινε εισαγωγή των στοιχείων προσδιορισμού των σημείων (ϕ , λ , N) και βάσει αυτών αποδόθηκε η μορφή του γεωειδούς της εξεταζόμενης περιοχής. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια συγκρίθηκε, αρχικά, με τρία (3) Παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς (EGM96, EGM2008 και EIGEN-6C4) ως προς τη μέση τιμή τους για το υψόμετρο του γεωειδούς (N), και δευτερευόντως με την τοπογραφία της περιοχής, με σκοπό την παρατήρηση ή όχι κάποιου είδους συσχέτισης.

ABSTRACT

The main objective of this diploma thesis is to compute a local geoid model for the area “Dionyssos Satellite Observatory Center” in Athens, Greece. To achieve this, GPS, gravity, as well as altitude measurements (geometric spatial alignment) were the three different methods that were performed, providing substantial information about the altitude, and therefore for the creation of the geoid model.

The goal is to apply these methods in order to validate whether the area of interest, which is less than 32 acres, is suitable to perform adequate calculations and/or detecting fluctuations.

The studied area was defined through an established network of fourteen (14) peaks, which were implemented on the ground. The location of these ground points was based on the homogenous coverage of the area, to avoid incomplete information of some of its parts. These points provided the measuring stations for gravity, GPS and altitude measurements and were completed within a two months period.

The primary measurements of the selected area, were analyzed to extract information about the its' altitude (orthometric and geometric altitudes). Next, a detailed analysis of the gravity measurements through the least squares' method determined their best values. Last, these values were exploited for the altimeter measurements correction. Despite the insignificant extent of the area, the orthometric altitudinal differences measured during the levelling were corrected before estimating the significance of the gravitational field. Consequently, the orthometric altitudes of the network peaks were used to calculate the local geoid model.

Finally, the GPS measurements were analyzed towards accurately locating the ground points ($X, Y, Z - \phi, \lambda, h$) in the WGS84 reference system.

After implementing data analysis during the fieldwork, the geoid model of the studied area was determined. The model was created with the Surfer software, which also allowed visualization of the results. The point's coordinates (ϕ, λ, N) were introduced in the software and the geoid form of the studied area was formed. This model was then compared with three (3) Global Geoid models (EGM96, EGM2008 and EIGEN-6C4), to test for correlation in their average value for the altitude of the geoid (N), and secondarily with the topography of the area.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεδομένου του σκοπού της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο οποίος όπως αναφέρθηκε έγκειται στη δημιουργία ενός τοπικού μοντέλου γεωειδούς για την περιοχή του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου, οργανώθηκε η δομή της, η οποία αποτελείται από εννέα (9) κεφάλαια.

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της επιστήμης της γεωδαισίας και των αντικειμένων της, προκειμένου να γίνει η αντιληπτή η εξέλιξή της στο πέρασμα των χρόνων και ιδίως η εξέλιξη που αφορά τις μετρήσεις στη γήινη επιφάνεια.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται ορισμένες βασικές έννοιες της φυσικής γεωδαισίας που σχετίζονται με τις επιφάνειες, συστήματα και πλαίσια αναφοράς, ιδίως αυτές/αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του γεωειδούς. Συγκεκριμένα περιγράφονται το υψόμετρο του γεωειδούς N και συνοπτικά οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της επιφάνειάς του, καθώς και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως (EGM96, EGM2008, EIGEN-6C4).
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η σύνδεση της βαρύτητας με το γεωειδές και αναλύεται η μέθοδος προσδιορισμού της (τιμή έντασης της βαρύτητας), η οποία εφαρμόστηκε στην εν λόγω διπλωματική εργασία.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο GPS, τις βασικές αρχές λειτουργίας του, τις μεθόδους προσδιορισμού της θέσης μέσω της χρήσης του (απόλυτος και σχετικός εντοπισμός θέσης), καθώς τη σχέση του με την υψομετρία (προσδιορισμός γεωμετρικού υψομέτρου h).
- Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται οι εργασίες πεδίου που υλοποιήθηκαν προκειμένου να συλλεχθεί ένας ικανοποιητικός όγκος δεδομένων, ο οποίος απαιτείται για τον προσδιορισμό του ζητούμενου μοντέλου γεωειδούς, ενώ ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στα όργανα και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.
- Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται διεξοδικά η διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων πεδίου, των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία τους, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή.
- Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται οπτικοποιημένο το υπολογισμένο μοντέλο γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, συνοδευόμενο από τις αντίστοιχες αναπαραστάσεις των παγκόσμιων μοντέλων γεωειδούς (EGM96, EGM2008, EIGEN-6C4) και τις μεταξύ τους συγκρίσεις.
- Στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ανά τα στάδια εκτέλεσής της (εργασίες πεδίου, -γραφείου, δημιουργία μοντέλου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

Η λέξη Γεωδαισία προέρχεται από το ουσιαστικό Γη και το αρχαίο ρήμα Δαίομαι που σημαίνει μοιράζω, διαιρώ. Ο ακριβής ορισμός της, δηλαδή είναι:

$$\text{«Γή + Δαίομαι = μοιράζω τη Γη»}$$

Η σύγχρονη αντίληψη για την επιστήμη της γεωδαισίας ακολουθεί τον ορισμό που της έδωσε ο Γερμανός γεωδαίτης Friederich Robert Helmert (1843- 1917) το 1880 στη μονογραφία του «*Die mathematischen und physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie*». Στην πρώτη παράγραφο του έργου αναφέρεται ως Γεωδαισία «...η επιστήμη της μέτρησης και απεικόνισης της γήινης επιφάνειας», ορισμός που στις μέρες θα πρέπει, για λόγους πληρότητας, να επεκταθεί με την προσθήκη «... και των χρονικών μεταβολών της».[Τσούλης Δ. 2005].

Πρόκειται, ουσιαστικά, για την γεωεπιστήμη που ασχολείται με παρατηρήσεις, μετρήσεις και υπολογισμούς που στοχεύουν στον προσδιορισμό του σχήματος και του μεγέθους της γήινης επιφάνειας και συγκεκριμένα των υψομέτρων του γεωειδούς σε τοπική, περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα. Ακόμη, ένα από τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει η γεωδαισία, αφορά στον υπολογισμό των μεγεθών εκείνων που προσδιορίζουν τη θέση ενός σημείου ανά τους διάφορους τόπους της επιφάνειας της γης.

Από τον ορισμό και το αντικείμενό της, η γεωδαισία φαίνεται να σχετίζεται άμεσα και με άλλες επιστήμες, όπως αυτή της Αστρονομίας, Γεωφυσικής, καθώς και με εκείνη της Χαρτογραφίας.

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα ζητούμενα, κάθε φορά, μεγέθη κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία πλαισίων αναφοράς, στα οποία θα εκτελούνται και θα ελέγχονται οι γεωδαιτικές εργασίες. Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις και υπολογισμούς, εκ των οποίων οι πρώτες υλοποιούνται με τη χρήση ψηφιακών οργάνων (π.χ. ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, ψηφιακοί χωροβάτες, δέκτες του συστήματος του δορυφορικού εντοπισμού, σαρωτές laser κ.α.).

1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Από την αρχή της εξέλιξης των φυσικών επιστημών, ο άνθρωπος άρχισε να απασχολείται ολοένα και περισσότερο με τον προσδιορισμό του σχήματος και του μεγέθους του πλανήτη που τον φιλοξενούσε.

Η πρώτη προσέγγιση για το σχήμα της γης, δόθηκε από τον «πατέρα της Γεωδαισίας» Ερατοσθένη (276 – 194 π.Χ.), ο οποίος ήταν ο πρώτος που υπολόγισε με αξιοσημείωτη ακρίβεια το μέγεθος της γης από μετρήσεις, υιοθετώντας το σφαιρικό της σχήμα. Ο χαρακτηρισμός του ως «πατέρας της Γεωδαισίας» του δόθηκε δικαίως, καθώς για πρώτη φορά χρησιμοποίησε τους όρους γεωγραφία, γεωγραφικό πλάτος και μήκος, και δημιούργησε χάρτη με μεσημβρινούς και παράλληλους (από τη χερσόνησο του Γιβραλτάρ έως τον ποταμό Γάγγη), αποδεικνύοντας μαθηματικά τη σφαιρικότητά της. [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. 2010].

Η προσέγγιση αυτή αμφισβητήθηκε, αρχικά, από το Γάλλο αστρονόμο I. Richer (1672), ενώ ακολούθησε ο Νεύτωνας, ο οποίος βασιζόμενος στις παρατηρήσεις του πρώτου διατύπωσε την άποψη ότι το σχήμα της γης είναι ένα ελλειψοειδές, πεπλατυσμένο στους πόλους, εφαρμόζοντας τους νόμους της βαρύτητας και της κίνησης. Στα πρώτα πεπλατυσμένα μοντέλα, οι τιμές της επιπλάτυνσης που δόθηκαν από τον Newton και Huygens (1629- 1695), ήταν αντίστοιχα 1/230 και 1/578, ενώ σήμερα η τιμή αυτή, βάσει δορυφορικών παρατηρήσεων, δίνεται ίση με 1/298.

Στους αιώνες που ακολούθησαν (18^{ος} – 19^{ος}) δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στις μετρήσεις τόξων μεσημβρινών απ' όπου προκύπτουν και οι διαστάσεις του ελλειψοειδούς σχήματος της γης (δηλ. ο μεγάλος ημιάξονας a , ο μικρός ημιάξονας b και η επιπλάτυνση $f, f=(a-b)/a$). Τα ελλειψοειδή που προέκυψαν στο διάστημα αυτό είναι αυτά των Delambre & Merchain, Everest, Airy, Bessel και τα δύο ελλειψοειδή του Clarke.

Η συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία και η εφεύρεση νέων οργάνων συνέβαλε θετικά στην πραγματοποίηση γεωδαιτικών, αστρονομικών και βαρυτομετρικών παρατηρήσεων, οι οποίες έθεσαν τα θεμέλια για τον προσδιορισμό μιας ακόμα πιο πιστής, ως προς τη Φ.Γ.Ε., επιφάνειας, το γεωειδές (επιφάνεια που προκύπτει από τις αποχές που παρουσιάζουν τα ήδη υλοποιημένα ελλειψοειδή αναφοράς). Παράλληλα, προσδιορίζονται και νέα ελλειψοειδή (Helmert, Hayford, GRS 67 κ.α.), με τελευταίο το GRS 80, που υιοθετήθηκε από τη Διεθνή Ένωση Γεωδαισίας και Γεωφυσικής (IUGG) το 1980 και το οποίο είναι αυτό που χρησιμοποιείται διεθνώς.

Τέλος, από το 1957 αρχίζει να αναπτύσσεται η γεωδαισία δορυφόρων. Οι παρατηρήσεις προς τους δορυφόρους γίνονται, αρχικά, χρησιμοποιώντας φωτογραφικά τηλεσκόπια και συστήματα τηλεμετρίας laser. Ταυτόχρονα εξελίσσονται και τα συστήματα γεωδαισίας δορυφόρων που βασίζονται στο φαινόμενο Doppler. Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς το αμερικανικό παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού GPS, ενώ ακολουθούν και άλλα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού, όπως το Ρώσικο GLONASS, το ευρωπαϊκό GALILEO και το κινέζικο BeiDou. Τα συστήματα αυτά συνεχώς εξελίσσονται σε πληρότητα, ευκολία χρήσης και παρεχόμενη ακρίβεια εντοπισμού. [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. 2010].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός που εξυπηρετεί η επιστήμη της γεωδαισίας, χρειάστηκε να προσδιοριστούν μοντέλα, τα οποία να προσεγγίζουν με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την πραγματική γήινη επιφάνεια, καθώς η τελευταία από τη φύση της δεν είναι κατάλληλη για τη μελέτη του σχήματος και του μεγέθους της γης στο σύνολό της ή ενός εκτεταμένου μέρους της. Ανάλογα λοιπόν, της εργασίας, του σκοπού για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και την επιδιωκόμενη ακρίβεια, υιοθετήθηκαν διάφορα μοντέλα που αποδίδουν απλούστερα τη Φ.Γ.Ε.. Η επιφάνεια που θα επιλεγεί ως ένα «μοντέλο» για τη μελέτη της μορφής της γης ονομάζεται επιφάνεια αναφοράς. Η πραγματική επιφάνεια μελετάται μέσω υπολογισμού των αποκλίσεων της από την επιφάνεια αναφοράς- μοντέλο.

Η μελέτη του σχήματος και του μεγέθους της γης στο σύνολο της ή μεγάλων τμημάτων της αντιμετωπίζεται με βάση τη διαδικασία προσδιορισμού διακριτών θέσεων, δηλαδή συντεταγμένων μεμονωμένων σημείων, χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις που συνδέουν άμεσα ή έμμεσα τα σημεία. Από τη στιγμή που για λόγους απλότητας της μαθηματικής και υπολογιστικής διαδικασίας επιλέγονται συντεταγμένες για να εκφράσουν τη θέση, απόλυτη ή σχετική, πρέπει να ορισθεί ένα σύστημα αναφοράς τους. Οι παρατηρήσεις που συνδέονται μαθηματικά με τις συντεταγμένες, αναφέρονται και αυτές στο σύστημα αναφοράς, το οποίο περιγράφει μαθηματικά και την επιφάνεια.

Τα σημεία της γήινης επιφάνειας προβάλλονται πάνω στην επιφάνεια αναφοράς που έχει επιλεγεί για το σχήμα της γης, όπου ορίζεται το σύστημα συντεταγμένων και ανάγονται οι αρχικές παρατηρήσεις. Όσον αφορά τη δορυφορική γεωδαισία, σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιείται άμεσα κάποια επιφάνεια αναφοράς των παρατηρήσεων αλλά ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο σύστημα στο οποίο αναφέρονται απευθείας οι δορυφορικές παρατηρήσεις και το οποίο περιγράφει μαθηματικά και την επιφάνεια αναφοράς. Προσδιορίζονται αρχικά οι συντεταγμένες στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα και στη συνέχεια εφόσον μας ενδιαφέρει η απεικόνιση σε χάρτες, μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα που ορίζεται πάνω στην επιφάνεια αναφοράς.

Πριν αναφερθούν οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται στη γεωδαισία, κρίνεται σκόπιμο να προσδιορισθεί η έννοια της Φ.Γ.Ε., καθώς είναι αυτή η πραγματική επιφάνεια της γης, την οποία προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε.

Η Φ.Γ.Ε. είναι η πραγματική επιφάνεια της γης, η οποία περιλαμβάνει την τοπογραφική επιφάνεια αλλά και την επιφάνεια των ωκεανών. Τόσο η τοπογραφική επιφάνεια (στεριά) όσο και η επιφάνεια και ο πυθμένας των ωκεανών, είναι πολύ ανώμαλες επιφάνειες και δεν μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας απλές μαθηματικές σχέσεις. Επειδή η φυσική επιφάνεια της γης αποτελείται από ανομοιογενές υλικό (72%

νερό και 28% στεριά), η συμπεριφορά της κυμαίνεται μεταξύ των δύο αυτών ακραίων καταστάσεων. Όταν, λοιπόν, γίνεται αναφορά στον προσδιορισμό του σχήματος και του μεγέθους της γης, η Φ.Γ.Ε. θεωρείται «συμπαγής». Πρόκειται ουσιαστικά για μία φανταστική επιφάνεια που πλησιάζει τη μέση στάθμη της θάλασσας (Μ.Σ.Θ.). [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. 2010].

Για να γίνει, λοιπόν, η μοντελοποίηση της πραγματικής επιφάνειας χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πολύπλοκες συναρτήσεις με πολλούς όρους. Επιλέγοντας όμως, κάποιο μαθηματικό μοντέλο, δηλαδή μία πιο απλή γεωμετρική επιφάνεια, η οποία θα χρησιμοποιείται ως βασική επιφάνεια, οι υπολογισμοί γίνονται απλούστεροι.

Μία πρώτη μαθηματική προσέγγιση της Φ.Γ.Ε. είναι να θεωρηθεί η γη ως *σφαίρα* με μέση ακτίνα καμπυλότητας $R = 6371 \text{ Km}$. Εξαιτίας όμως της περιστροφής της γύρω από τον άξονά της, η γη έχει πάρει το σχήμα ενός *ελλειψοειδούς εκ περιστροφής*. Βέβαια η γη δεν αποτελείται από ομοιογενές υλικό και με την περιστροφή της θα ήταν πιο σωστό να θεωρήσει κανείς ότι παίρνει τη μορφή ενός σφαιροειδούς πεπλατυσμένου στους πόλους. Η απόκλιση όμως από μία τέτοια παραδοχή δεν είναι τόσο μεγάλη, ώστε το σχήμα δεν αποκλίνει πολύ από ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. [Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ., Παπαζήση Κ., 2006].

Αν το μοντέλο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τελειοποιηθεί έτσι ώστε να έχει τις ίδιες μηχανικές (φυσικές) ιδιότητες και όσο το δυνατό λιγότερες επιφανειακές ανωμαλίες από την πραγματική επιφάνεια της γης, θα πρέπει η περιβάλλουσα επιφάνεια να είναι μια ισοδυναμική (χωροσταθμική) επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας της γης. Η επιφάνεια αυτή που εκλέγεται να πλησιάζει περισσότερο από κάθε άλλη ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας της γης τη μέση στάθμη της θάλασσας (μ.σ.θ.), είναι το *γεωειδές*. [Βέης Γ., Μπιλλήρης Χ., Παπαζήση Κ., 2006].

Έτσι, λοιπόν οι βασικές επιφάνειες αναφοράς που χρησιμοποιούνται στη γεωδαισία για να περιγράψουν το φυσικό και γεωμετρικό μοντέλο της γης και πάνω στις οποίες προβάλλουμε τα σημεία της Φ.Γ.Ε. για να προσδιορίσουμε τη θέση τους, αλλά και τις μετρήσεις μας για να κάνουμε τους υπολογισμούς μας, είναι τρεις:

- **το γεωειδές** (φυσικό μοντέλο),
- **το ελλειψοειδές εκ περιστροφής** (μαθηματικό μοντέλο) και
- **η σφαίρα** (προσεγγιστικό μοντέλο).

Όσον αφορά στις τοπογραφικές εργασίες, στις οποίες συνήθως απαιτείται η απεικόνιση μεγάλων τμημάτων της επιφάνειας της γης, το *επίπεδο* είναι η πιο απλή μαθηματική επιφάνεια που ενδείκνυται για την υλοποίησή τους. Ακόμη, αν πρόκειται για περιοχές μικρής έκτασης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τοπικά, μοντέλα επίπεδης προβολής που εφάπτονται σε συγκεκριμένο σημείο του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής.

2.1 ΓΕΩΕΙΔΕΣ ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Μία αρκετά χρήσιμη επιφάνεια που χρησιμοποιείται στη Γεωδαισία τόσο για τη μελέτη του πεδίου βαρύτητας, όσο και για τις διάφορες τοπογραφικές εφαρμογές είναι αυτή της ισοδυναμικής επιφάνειας. Μία ισοδυναμική επιφάνεια ορίζεται από το σύνολο των σημείων του τρισδιάστατου χώρου που έχουν την ίδια αριθμητική τιμή δυναμικού. Υπάρχουν άπειρες ισοδυναμικές επιφάνειες του πεδίου βαρύτητας που καλύπτουν όλο τον τρισδιάστατο χώρο και εκτείνονται και στο εσωτερικό των γήινων μαζών. Από το σύνολο των ισοδυναμικών αυτών επιφανειών υπάρχει κάποια που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδέεται με την άμεση κοινή αντίληψη του υψομέτρου και της υψομετρικής διαφοράς και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ως η επιφάνεια αναφοράς στα περισσότερα συστήματα υψών. Η επιφάνεια αυτή είναι το γεωειδές και εισήχθη από τον Gauss ως η μαθηματική μορφή της γης, όπου σε κάθε σημείο της η κατακόρυφος είναι κάθετη σε αυτήν. [Τσούλης Δ., 2005]. Ένας πιο πλήρης ορισμός του γεωειδούς είναι ο εξής:

Γεωειδές είναι εκείνη η ισοδυναμική επιφάνεια του πραγματικού γήινου πεδίου βαρύτητας που προσαρμόζεται όσο το δυνατόν καλύτερα στη μέση στάθμη των θαλασσών σε παγκόσμια κλίμακα. Το γεωειδές υλοποιείται από τη Μ.Σ.Θ. με ακρίβεια $\pm 1\text{m}$ για όλη τη γη, και σύμφωνα με τον ορισμό της ισοδυναμικής επιφάνειας εκτείνεται και κάτω από τις τοπογραφικές μάζες των ηπείρων. Η μη σύμπτωση της μέσης στάθμης της θάλασσας με ισοδυναμική επιφάνεια του πεδίου βαρύτητας οφείλεται κυρίως στη διαφορετική θερμοκρασία και αλατότητα καθώς και στα θαλάσσια ρεύματα στους ωκεανούς.

Η ισοδυναμική αυτή επιφάνεια, όπως και κάθε άλλη ισοδυναμική επιφάνεια, παρέχει την πληροφορία της τρίτης διάστασης στον προσδιορισμό της θέσης ενός χαρακτηριστικού σημείου του εδάφους, την πληροφορία δηλαδή του ύψους και της υψομετρικής διαφοράς. Η έννοια του ύψους συνδέεται μονοσήμαντα με τη γεωμετρική και δυναμική πληροφορία που δίνεται από τις ισοδυναμικές επιφάνειες και συγκεκριμένα από τις διαφορές δυναμικού που υπάρχουν μεταξύ τους. [Τσούλης Δ., 2005]. Σήμερα, μέσω δορυφορικών μετρήσεων είναι δυνατό να μετρηθούν ύψη όχι μόνο στη στεριά με τις κλασικές επίγειες αστρογεωδαιτικές και βαρυτομετρικές μετρήσεις αλλά και στη θάλασσα (δορυφορική αλτιμετρία), παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό του γεωειδούς. Μέσω των δορυφορικών μετρήσεων αποδείχθηκε ότι το γεωειδές παρουσιάζει μια ασυμμετρία, με το βόρειο ημισφαίριο να είναι λίγο στενότερο από το νότιο. [Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., 2000].

Παρόλο που η εν λόγω επιφάνεια είναι κατάλληλη για τα (ορθομετρικά) υψόμετρα, δεν είναι εξίσου αποτελεσματική για τον οριζόντιο προσδιορισμό θέσης, καθώς είναι μια πολύπλοκη μαθηματική επιφάνεια, χωρίς κλειστή αναλυτική εξίσωση, και άρα πρακτικά μη βολική. Σε πρώτη προσέγγιση το γεωειδές μοιάζει με μία σφαίρα, ενώ

καλύτερα, με ένα ελλειψοειδές εκ περιστροφής. Ένα μικρό τμήμα του «ταυτίζεται» με ένα οριζόντιο επίπεδο (τοπογραφικό επίπεδο).

Αναφορικά με τη Μ.Σ.Θ., σημειώνεται ότι πρόκειται για μία επιφάνεια που μεταβάλλεται με το χρόνο περιοδικά, λόγω εποχιακών κυρίως μεταβολών της θερμοκρασίας της θάλασσας, της ατμοσφαιρικής πίεσης και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων (της τάξεως των 20cm στις ελληνικές θάλασσες), αλλά και με συστηματικό τρόπο, εξαιτίας μικρών αλλά συνεχών μεταβολών της θερμοκρασίας, της τήξης των πάγων, καθώς και της μεταβολής των ωκεάνιων λεκανών, που οφείλεται τόσο σε γεωλογικές αιτίες, όσο και στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Η Μ.Σ.Θ. προσδιορίζεται με τη βοήθεια παλιρροιογράφων, που καταγράφουν τη μεταβολή της στάθμης συναρτήσει του χρόνου σε εγκαταστάσεις κατά μήκος των ακτών, ενώ στους ωκεανούς μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με τη βοήθεια τεχνητών δορυφόρων, οι οποίοι μετρούν την απόστασή τους από την επιφάνεια της θάλασσας με χρήση ειδικών συσκευών ραντάρ, η ακρίβεια των οποίων σήμερα φτάνει την τάξη των μερικών εκατοστών (cm).[Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ., Μπαλοδήμος Δ.Δ, 1991].

Η στάθμη αυτή λαμβάνεται ως μηδενική, δηλαδή με μηδέν (ορθομετρικό: Η) υψόμετρο. Το γεωειδές είναι η κατάλληλη επιφάνεια αναφοράς για τα ορθομετρικά υψόμετρα που προσδιορίζονται μέσω της μεθόδου της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Το μηδέν του παλιρροιογράφου συνδέεται με χωροστάθμηση με ένα γειτονικό σημείο, το οποίο αποτελεί το βασικό σημείο αναφοράς των χωροσταθμήσεων σε μία χώρα.

2.2 ΕΛΛΕΙΨΟΕΙΔΕΣ ΕΚ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η χρήση του γεωειδούς ως επιφάνειας αναφοράς για τον προσδιορισμό απόλυτων και σχετικών θέσεων οριζοντιογραφικά, είναι ιδιαίτερα δύσκολη και για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η χρήση μίας άλλης μαθηματικής επιφάνειας που να εκφράζεται με όσο το δυνατόν απλούστερες μαθηματικές σχέσεις. Ως τέτοια επιφάνεια χρησιμοποιείται το ελλειψοειδές εκ περιστροφής.

Το ελλειψοειδές εκ περιστροφής είναι μία μαθηματική επιφάνεια η οποία δημιουργείται από την περιστροφή μίας έλλειψης γύρω από τον μικρό άξονά της. Ορίζεται αν είναι γνωστά ο μεγάλος ημιάξονας a και η επιπλάτυνση f [$f = (a-b)/a$] ή ο μικρός ημιάξονας b και η εκκεντρότητα του e [$e = \{(a^2 - b^2)/a^2\}^{1/2}$]. Ένα ελλειψοειδές πρέπει να προσαρμόζεται όσο γίνεται καλύτερα στη μορφή της γης, δηλαδή να έχει μικρές αποχές από την επιφάνεια του γεωειδούς σε κάθε σημείο. Επιπλέον, το ελλειψοειδές του οποίου το κέντρο ταυτίζεται με το κέντρο μάζας της γης και ο άξονας συμμετρίας του ταυτίζεται με τον μέσο άξονα περιστροφής της, ονομάζεται γήινο ή γεωκεντρικό ελλειψοειδές. Προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα (σε διαστάσεις) το

γεωειδές σε παγκόσμια κλίμακα και μπορεί να προσδιοριστεί από γεωδαιτικές μετρήσεις ή/και από καθαρά δυναμικά στοιχεία, από παρατηρήσεις σε τεχνητούς δορυφόρους. Οι μέγιστες αποχές από το γεωειδές είναι περίπου 100m, με μέσο όρο $\pm 30\text{m}$. Η μη πλήρης ταύτιση του ΕΕΠ με το γεωειδές οφείλεται κυρίως στην ανώμαλη κατανομή των μαζών, με διαφορετικές πυκνότητες, στο σταθερό φλοιό της γης. Συνεπώς ένα παγκόσμιο ελλειψοειδές δεν είναι δυνατό να «ταιριάζει» το ίδιο καλά σε κάθε περιοχή της γης [Βέης Γ., κ.α., 2007]. Επομένως κάθε χώρα ή ήπειρος για την κάλυψη των αναγκών της μπορεί να χρησιμοποιεί είτε ένα δικό της ΕΕΠ, είτε το ίδιο παγκόσμιο ελλειψοειδές, μετατοπισμένο τόσο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αποχές από την μορφή του τοπικού γεωειδούς της περιοχής αυτής. Τα υψόμετρα που μετρούνται από το ελλειψοειδές ονομάζονται γεωμετρικά υψόμετρα και συμβολίζονται με: h .

Τέλος, γεωδαιτικό ελλειψοειδές θεωρείται εκείνο που ταιριάζει καλύτερα στο γεωειδές μίας συγκεκριμένης περιοχής, είναι παράλληλα μετατοπισμένο ως προς το γήινο και μπορεί να έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό.

2.3 ΣΦΑΙΡΑ

Η σφαίρα είναι μια απλούστερη μαθηματική έκφραση μοντέλου που προσεγγίζει με μικρότερη, όμως, ακρίβεια από όσο ένα ΕΕΠ, στο σύνολό του το γεωειδές. Πρόκειται για σφαίρα με κέντρο το κέντρο μάζας της γης και ακτίνα την μέση ακτίνα καμπυλότητας του ελλειψοειδούς εκ περιστροφής. Τοπικά για μικρές σχετικά αποστάσεις μπορεί η σφαίρα (εγγύτατη στο σημείο) να αντικαταστήσει το ελλειψοειδές με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ για εφαρμογές ναυσιπλοΐας συχνά η επιφάνεια της σφαίρας αποτελεί την επιφάνεια αναφοράς της Φ.Γ.Ε.. Η εν λόγω επιφάνεια ενδείκνυται και στις περιπτώσεις της Αστρονομίας και Ουράνιας Μηχανικής, στη Χαρτογραφία μικρής κλίμακας, όπου θεωρείται ότι έχει επιφάνεια ίση με αυτή του ελλειψοειδούς, και ονομάζεται ισοδύναμη σφαίρα, και σε λιγότερες περιπτώσεις στη Γεωδαισία.

Από την επιφάνεια της σφαίρας δεν μετρούνται υψόμετρα. Οι υπολογισμοί στην επιφάνειά της γίνονται με βάση των τύπων της σφαιρικής τριγωνομετρίας.

Η μαθηματική έκφραση της θέσης των σημείων της επιφάνειας της σφαίρας με ακτίνα $R = 6371 \text{ Km}$, όταν το κέντρο του συστήματος αναφοράς είναι το κέντρο της σφαίρας είναι:

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2$$

Κάθε άλλος υπολογισμός στην επιφάνειά της γίνεται, όπως αναφέρθηκε, με τη χρήση των τύπων της σφαιρικής τριγωνομετρίας.

2.4 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Κατά την απεικόνιση της γήινης επιφάνειας σε χάρτες ορίζεται η επίπεδη «οριζόντια» θέση ή και η υψομετρική (π.χ. με τη μορφή ισοϋψών καμπυλών). Για εκτάσεις της τάξης των μερικών χιλιομέτρων (ενδεικτικά: 10 Km x 10 Km) η μέτρηση γωνιών και αποστάσεων μεταξύ διάφορων σημείων της επιφάνειας της γης είναι δυνατό να απεικονιστεί σε ένα οριζόντιο επίπεδο όπου μπορούμε να ορίσουμε αυθαίρετα ένα ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς. Η ταύτιση αυτή είναι δυνατή, δεδομένου ότι για τέτοιας έκτασης περιοχές, η κατακόρυφος που υλοποιείται από τα όργανα μέτρησης σε κατακόρυφη οριζοντίωση διατηρείται πρακτικά παράλληλη για όλα τα σημεία, έχει δηλαδή την ίδια διεύθυνση παντού. Όταν όμως η προβολή σε επίπεδο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση μεγαλύτερων περιοχών ή μιας ολόκληρης χώρας, τότε πρέπει να εφαρμόζονται οι αντίστοιχες αναγωγές των μεγεθών που απεικονίζονται, ανάλογα με την απεικόνιση που χρησιμοποιείται. Η μη κατάλληλη ή και καθόλου αναγωγή, ενδείκνυται να παρουσιάσει σημαντικές ασυμβατότητες και αυτό επειδή η παραπάνω υπόθεση της παραλληλίας της κατακορύφου δεν θα ισχύει πλέον, λόγω της γήινης καμπυλότητας ή/και του πεδίου βαρύτητας.

2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Ως σύστημα αναφοράς στη γεωδαισία ορίζεται το σύνολο των παραμέτρων και των συστημάτων συντεταγμένων, που εφαρμόζεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή και σε ολόκληρη τη γη και ως προς το οποίο:

1. Καθορίζονται οι θέσεις σημείων και αντικειμένων της ΦΓΕ, στο χώρο.
2. Μελετάται η κίνηση ή/και η δυναμική συμπεριφορά τους με το χρόνο (γεωδυναμικά, τεκτονικά φαινόμενα).

Για λόγους απλότητας στη μαθηματική επεξεργασία τα συστήματα αναφοράς ορίζονται ως ορθοκανονικά, δηλαδή καρτεσιανά και συμβατικά δεξιόστροφα. Μία αρχή και τρία μοναδιαία αμοιβαίως ορθογώνια διανύσματα συνιστούν τη βάση για τον ορισμό ενός καρτεσιανού συστήματος αναφοράς. Στη γεωδαισία έχει μεγάλη σημασία η επιλογή της αρχής και του προσανατολισμού των αξόνων των συστημάτων αναφοράς. Η επιδίωξη της απλότητας αποτελεί πάντοτε μία σημαντική παράμετρο, ενώ η επιλογή ενός ΣΑ θα πρέπει να εξυπηρετεί και άλλες γεωδαιτικές ανάγκες, όπως την περιγραφή της κίνησης των ουράνιων σωμάτων και των τεχνητών δορυφόρων. Βέλτιστα συστήματα αναφοράς είναι κυρίως τα γεωκεντρικά, επίγεια ή αδρανειακά.[Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., 2000].

Στη γεωδαισία, καθώς και σε άλλες συγγενείς επιστήμες εκτός από τις καρτεσιανές χρησιμοποιούνται και άλλα είδη συντεταγμένων, όπως οι ελλειψοειδείς, τοποκεντρικές, σφαιρικές και πολικές, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις είναι πιο βολικές, ενώ εύκολα μετασχηματίζονται σε καρτεσιανές. Ακόμη, στη γεωδαισία χρησιμοποιούνται τα γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς ή γεωδαιτικά datum τα οποία σχετίζονται επιπλέον και με την επιλογή μιας επιφάνειας αναφοράς, συνήθως ενός ΕΕΠ με συγκεκριμένες γεωμετρικές και φυσικές παραμέτρους.[Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., 2000].

2.5.1 ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η Διεθνής Υπηρεσία Περιστροφής της Γης (IERS: International Earth Rotation Service), ιδρύθηκε το 1987 από την IUGG και την IAU. Πρόκειται για μία υπηρεσία που διασυνδέει επιστημονικά τις επιστήμες της αστρονομίας, της γεωδαισίας και της γεωφυσικής, παρέχοντας χρήσιμα αποτελέσματα και για τις τρεις. Σκοπός της είναι ο ορισμός, η υλοποίηση και παρακολούθηση συμβατικών συστημάτων και πλαισίων αναφοράς, επίγειων και ουράνιων, ο προσδιορισμός των παραμέτρων προσανατολισμού της γης ως συνάρτηση του χρόνου για τη σύνδεση του επίγειου με το ουράνιο σύστημα (EOP: Earth Orientation Parameters), ο προσδιορισμός επίγειων και ουράνιων συντεταγμένων του πόλου, ο προσδιορισμός του παγκόσμιου χρόνου (UT1) και η έγκαιρη παροχή όλων των υψηλής ακρίβειας δεδομένων για τρέχουσα χρήση και για διαχρονικές μελέτες.[Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., 2000].

Στα Διεθνή Συστήματα και Πλαίσια αναφοράς ανήκουν:

- Το Διεθνές Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς (ICRS: Intern. Celestial Reference System)
- Το Διεθνές Ουράνιο Πλαίσιο Αναφοράς (ICRF: Intern. Celestial Reference Frame)
- Το Διεθνές Επίγειο Σύστημα Αναφοράς (ITRS: Intern. Terrestrial Reference System)
- Το Διεθνές Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (ITRF: Intern. Terrestrial Reference Frame)
- Το Ευρωπαϊκό Σύστημα και Πλαίσιο Αναφοράς (ETRS, ETRF: European Terrestrial Reference System, European Terrestrial Reference Frame)

Από τις Διεθνείς υπηρεσίες αξίζει να αναφερθεί αυτή που ιδρύθηκε από τη Διεθνή Ένωση Γεωδαισίας (IAG: Intern. Association of Geodesy), η Διεθνής Υπηρεσία IGS (IGS: Intern. GPS Service). Η ίδρυσή της πραγματοποιήθηκε το 1993, με σκοπό την υποστήριξη των γεωδαιτικών και γεωφυσικών ερευνητικών δραστηριοτήτων καθώς και επιστημονικών μελετών και εφαρμογών που απασχολούν όλους τους χρήστες.

Τα προϊόντα που παρέχει ελεύθερα η IGS είναι:

- Δορυφορικές εφημερίδες GPS (IGS orbits).
- Παρατηρήσεις GPS και άλλα σχετικά δεδομένα.
- Παράμετροι περιστροφής της γης.
- Συντεταγμένες και ταχύτητες ενός συνόλου (περίπου 200) μόνιμων σταθμών παρακολούθησης GPS (δίκτυα IGS).
- Στοιχεία των χρονομέτρων των δορυφόρων GPS και των σταθμών (δέκτες GPS), καθώς και
- Στοιχεία για την τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα.

Σχετικά με τις δορυφορικές εφημερίδες της IGS σημειώνεται ότι αναφέρονται κάθε φορά στο ισχύον πλαίσιο αναφοράς ITRFyy, όπου ο δείκτης yy αφορά το τρέχον έτος [www.igs.org].

2.5.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WGS 84

Το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS 84 (World Geodetic System 1984) του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ είναι ένα από τα προϊόντα της NIMA (National Imagery and Mapping Agency, πρώην DMA: Defense Mapping Agency).

Πρόκειται για ένα επίγειο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, το οποίο θεωρείται πως δεν έχει κάποια σχετική περιστροφή ως προς το φλοιό της γης συναρτήσει του χρόνου. Από το 1998 και έκτοτε γίνεται προσπάθεια ταύτισής του, όσο το δυνατόν περισσότερο, με το ITRS.

Το ελλειψοειδές του WGS 84 (GRS80) ορίζεται από τις παραμέτρους:

a: μέγας ημιάξονας ($= 6378137,0$ m, όσο και του GRS 80)

f: επιπλάτυνση ($1/f = 1/298,257223563$)

GM: γήινη βαρυτική σταθερά $= (3986004,418 \pm 0,008) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$, συνυπολογιζόμενης και της μάζας της ατμόσφαιρας

ω : γωνιακή ταχύτητα της γης ($= 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/sec}$)

Από τις παραπάνω μεταβλητές υπολογίζεται οποιαδήποτε άλλη γεωμετρική και φυσική παράμετρος του ελλειψοειδούς. Η διαφορά στην επιπλάτυνση μεταξύ WGS 84 και GRS 80, πρακτικά, είναι αμελητέα. Οι διαφορές των αντίστοιχων μικρών αξόνων είναι 0,1mm. Για αυτό ως προς τις διαστάσεις τους τα ελλειψοειδή είναι πρακτικά ίδια.

Το πλαίσιο αναφοράς του WGS 84 συμφωνεί με το ITRF για την ίδια εποχή αναφοράς με ακρίβεια της τάξης των 5cm. Οι συντεταγμένες ως προς το WGS84 από παρατηρήσεις GPS και με τη χρήση των εκπεμπόμενων εφημερίδων ακριβείας έχουν ακρίβεια της τάξης των μερικών δεκάδων εκατοστών (χωρίς τα εσκεμμένα σφάλματα). Η ακρίβεια ως προς το ITRF, με παρατηρήσεις GPS και με ακριβείς εφημερίδες της IGS, είναι της τάξης του εκατοστού.[Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., 2000].

2.5.3 ΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ITRF 2014

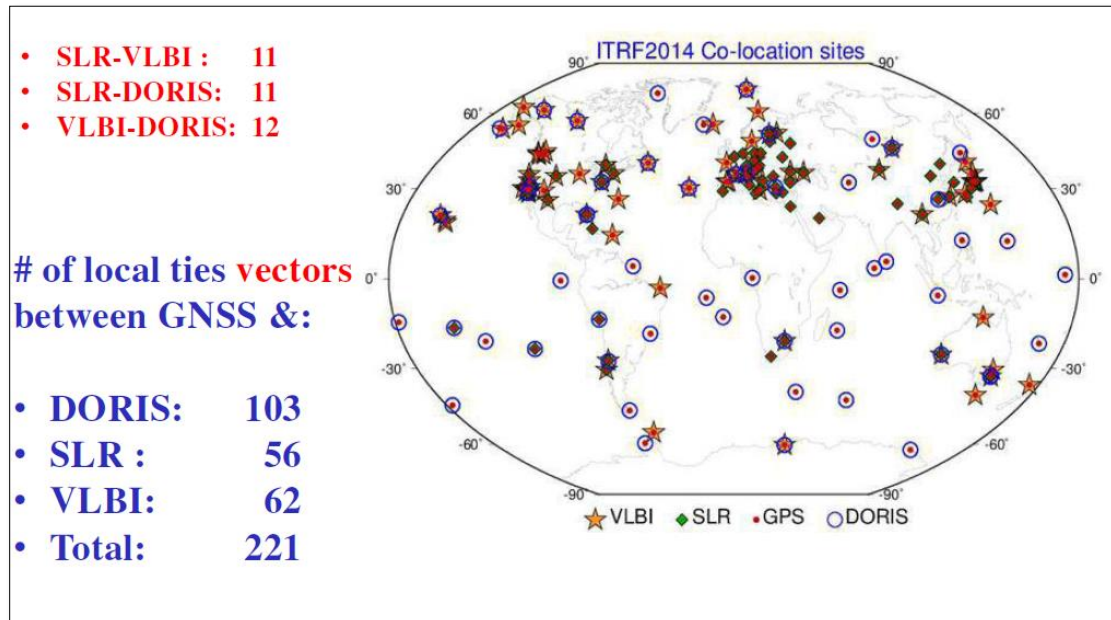
Ένα Διεθνές Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (ITRF: International Terrestrial Reference Frame) υλοποιείται από το Διεθνές Σύστημα Επίγειας Αναφοράς (ITRS: International Terrestrial Reference System), το οποίο διατηρείται από τη Διεθνή Υπηρεσία Περιστροφής της Γης και Συστημάτων Αναφοράς (IERS: International Earth Rotation and Reference System) [itrf.ensg.ign.fr].

Ένα επίγειο σύστημα αναφοράς (TRS) είναι ένα σύστημα χωρικής αναφοράς που ακολουθεί την περιστροφή της γης στην καθημερινή της κίνηση στο διάστημα. Το ITRS επιβάλλει μια κατάσταση μη σταθερής περιστροφής, όσον αφορά στις οριζόντιες κινήσεις, που σημαίνει ότι το σημείο αναφοράς δε συνδέεται με καμία συγκεκριμένη τεκτονική πλάκα. Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι θέσεις των σημείων πάνω στη γήινη επιφάνεια (στερεή επιφάνεια) έχουν συντεταγμένες, οι οποίες υποβάλλονται μόνο σε μικρές παραλλαγές με το χρόνο, λόγω γεωφυσικών επιδράσεων (τεκτονικές ή παλιρροιακές παραμορφώσεις). Ένα Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (TRF) είναι ένα σύνολο φυσικών σημείων με, επακριβώς, καθορισμένες συντεταγμένες σε ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων (καρτεσιανό, γεωγραφικό, χαρτογράφησης κ.α.), προσαρτημένο σε ένα επίγειο σύστημα αναφοράς. Ένα τέτοιο TRF λέγεται ότι είναι μία υλοποίηση του TRS.

Οι λύσεις ITRF δεν χρησιμοποιούνται απευθείας σε ένα ελλειψοειδές, καθορίζονται από τις καρτεσιανές (ECEF: Earth- Centered, Earth- Fixed) συντεταγμένες X, Y, Z. Αν χρειάζεται είναι δυνατό να μετατραπούν σε γεωδαιτικές συντεταγμένες (ϕ , λ , h) που αναφέρονται σε ένα ελλειψοειδές. Στην περίπτωση αυτή συνιστάται η χρήση του ελλειψοειδούς GRS80.

Το Διεθνές Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (ITRF) 2014, δημοσιεύθηκε από την IERS στις 22 Ιανουαρίου 2016. Έχει υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας λύσεις από τέσσερις διαστημικές γεωδαιτικές τεχνικές διαστήματος: VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), and GPS (Global Positioning System), με τεχνικά κέντρα: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS; ivscc.gsfc.nasa.gov), International Laser Ranging Service (ILRS; ilrs.gsfc.nasa.gov),

International DORIS Service (IDS; ids-doris.org), και το International GNSS Service (IGS; igsb.jpl.nasa.gov).



Εικόνα 1: Θέσεις και αριθμός των μόνιμων σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ITRF2014

[Πηγή: <http://www.igs.org>]

Τα δεδομένα που εισήχθησαν για τη δημιουργία του είναι:

Service/Technique	Number of Solutions	Time span	# of sites
IGS/GNSS/GPS	7714 daily	1994.0 – 2015.1 (21 yrs)	884
IVS/VLBI	5328 daily	1980.0 – 2015.0 (35 yrs)	124
ILRS/SLR	244 fortnightly	1980.0 – 1993.0	96
	1147 weekly	1993.0 – 2015.0 (35 yrs)	
IDS/DORIS	1140 weekly	1993.0 – 2015.0 (22 yrs)	71

Εικόνα 2: Δεδομένα δημιουργίας του ITRF2014 [Πηγή: <http://www.igs.org>]

2.6 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ 1987

Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς για την Ελλάδα, το οποίο προέκυψε από συνδυασμό γεωδαιτικών και δορυφορικών μετρήσεων είναι το ΕΓΣΑ87. Πρόκειται για ένα (καρτεσιανό) σύστημα αναφοράς με ελλειψοειδές του. το GRS80 που είναι παράλληλα προσανατολισμένο ως προς το παγκόσμιο (γεωκεντρικό) σύστημα BTS87, έτσι ώστε να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στο γεωειδές του ελληνικού χώρου.

Χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο προσαρμογής [$\Sigma(\xi)=0$, $\Sigma(\eta)=0$, $\Sigma(N)=0$], από όπου με γνωστό το γεωειδές του ελληνικού χώρου στο σύστημα του GRS80, προέκυψε παράλληλη μετάθεση (ΔX , ΔY , ΔZ), δηλαδή οι γεωκεντρικές συντεταγμένες του κέντρου του ΕΕΠ ή της αρχής του συστήματός του. Η μετάθεση αυτή αν αφαιρεθεί από τις ήδη γνωστές γεωκεντρικές συντεταγμένες του Κεντρικού Βάθρου (CP) του Δορυφορικού Σταθμού του Διονύσου Αττικής, δίνει τις καρτεσιανές συντεταγμένες (X , Y , Z) του CP στο σύστημα του ΕΕΠ. Οι τιμές αυτές μετατρέπόμενες σε γεωδαιτικές (ϕ , λ , h) και στρογγυλοποιημένες μερικά εκατοστά, αποτέλεσαν τις συμβατικές τιμές του θεμελιώδους σημείου CP του Διονύσου:

$$\phi = 34^{\circ} 04' 33''.8107, \quad \lambda = 23^{\circ} 55' 55''.0095, \quad h = 481,711 \text{ m } (N = +7\text{m})$$

Το ΕΓΣΑ87 εφαρμόζεται με την Εγκάρσια Μερκατορική απεικόνιση, μιας ζώνης για όλη την Ελλάδα (TM87), με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda = 24^{\circ}$ ως προς Greenwich, άξονα τετμημένων τον ισημερινό, προσθετική σταθερά = 500000 m και συντελεστή κλίμακας στον κεντρικό μεσημβρινό $m_0 = 0.9996$. Το σύστημα αυτό μπορεί να συνδέεται με υψηλή ακρίβεια με όλα τα παγκόσμια γεωδαιτικά συστήματα αναφοράς [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., 2010].

2.6.1 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ

Οι πληροφορίες σχετικά με τον ορισμό της επιφάνειας αναφοράς του Ελληνικού Συστήματος των Υψομέτρων, κατά τη διάρκεια των χρόνων, με αφετηρία το 1987 έως σήμερα έχουν μεταβληθεί. Το 1987 ορίστηκε ως επιφάνειας αναφοράς των υψομέτρων η ΜΣΘ, όπως προσδιορίστηκε από μετρήσεις του παλιρροιογράφου του Πειραιά το 1918, με σημαντικό σφάλμα. Το 1989 αναφέρεται ότι ως αρχικό σημείο για την ηπειρωτική Ελλάδα είναι η υψομετρική αφετηρία που βρίσκεται κοντά στον παλιρροιογράφο του Πειραιά με τιμή $H = 14,66470 \text{ m}$, ενώ για την Κρήτη είναι η υψομετρική αφετηρία που βρίσκεται κοντά στον παλιρροιογράφο του Ηρακλείου με τιμή $H = 0,40692 \text{ m}$, ενώ για τα υπόλοιπα νησιά χρησιμοποιήθηκαν τοπικοί παλιρροιογράφοι. Σήμερα έχει γίνει αποδεκτό ότι το ΕΣΥ έχει ως επιφάνεια αναφοράς τη ΜΣΘ, όπως έχει προσδιοριστεί από την Υδρογραφική Υπηρεσία του ΓΕΝ (Γενικό Επιτελείο Ναυτικού) από τις καταγραφές του παλιρροιογράφου του Πειραιά. Ως

σημείο αναφοράς θεωρείται η υψομετρική αφετηρία R287 που βρίσκεται κοντά στον παλιρροιογράφο, στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, με τιμή ορθομετρικού υψομέτρου $H_{R287} = 14,665 \text{ m}$. Στα μεγαλύτερα νησιά της Ελλάδας έχουν ιδρυθεί ανεξάρτητα υψομετρικά δίκτυα που είναι εξαρτημένα από αφετηρίες που βρίσκονται κοντά σε τοπικούς παλιρροιογράφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΩΕΙΔΕΣ ΚΑΙ ΥΨΟΜΕΤΡΑ

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν περί επιφανειών και συστημάτων αναφοράς, γίνεται αντιληπτό ότι προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μοντέλο γεωειδούς, σε τοπικό ή και παγκόσμιο επίπεδο, μεταξύ άλλων παραμέτρων, χρειάζονται υψόμετρα (γεωμετρικό, ορθομετρικό).

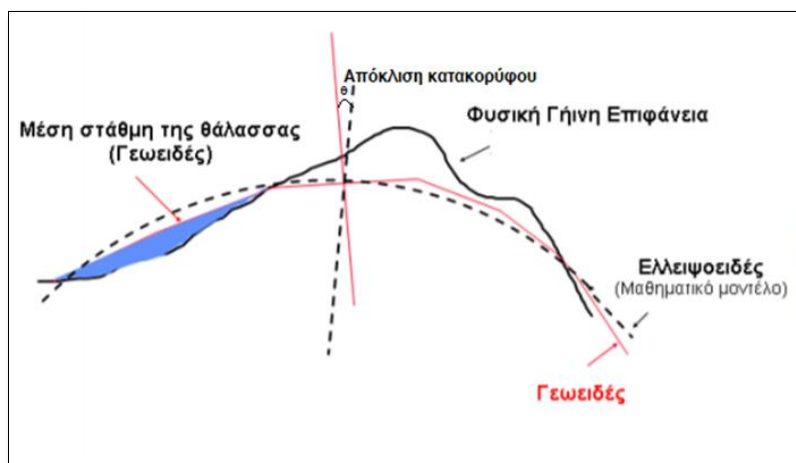
3.1 ΣΧΕΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ

Ένα ΕΕΠ συγκεκριμένων διαστάσεων θα πρέπει να έχει μία συγκεκριμένη θέση στο χώρο, δηλαδή ως προς το γεωειδές ή ως προς τη γη. Είναι επιθυμητό το μοντέλο που είναι το ΕΕΠ να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στο γεωειδές, δηλαδή στη φυσική πραγματικότητα. Στην ιδανική περίπτωση, η προσαρμογή αυτή θα είναι βέλτιστη σύμφωνα με κάποια κριτήρια προσαρμογής (π.χ. το άθροισμα των τετραγώνων των αποχών μεταξύ των δύο επιφανειών να είναι το ελάχιστο).

3.1.1 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ

Δεδομένου ότι η επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς αναφοράς δεν ταυτίζεται πλήρως με την επιφάνεια του γεωειδούς, αλλά την προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο, αν σε ένα σημείο της ΦΓΕ φέρουμε μία κάθετο στο αναφερόμενο ελλειψοειδές, αυτή δεν θα συμπίπτει με την κατακόρυφο του σημείου, στο γεωειδές. Η γωνία (θ) που σχηματίζεται σε κάθε σημείο της ΦΓΕ από την κατακόρυφο και την κάθετο στο ελλειψοειδές, λέγεται απόκλιση της κατακορύφου και είναι μία γωνία στο χώρο, η οποία δίνει και την κλίση μεταξύ των δύο επιφανειών, με την τιμή της να κυμαίνεται από $-10''$ έως και $+10''$.

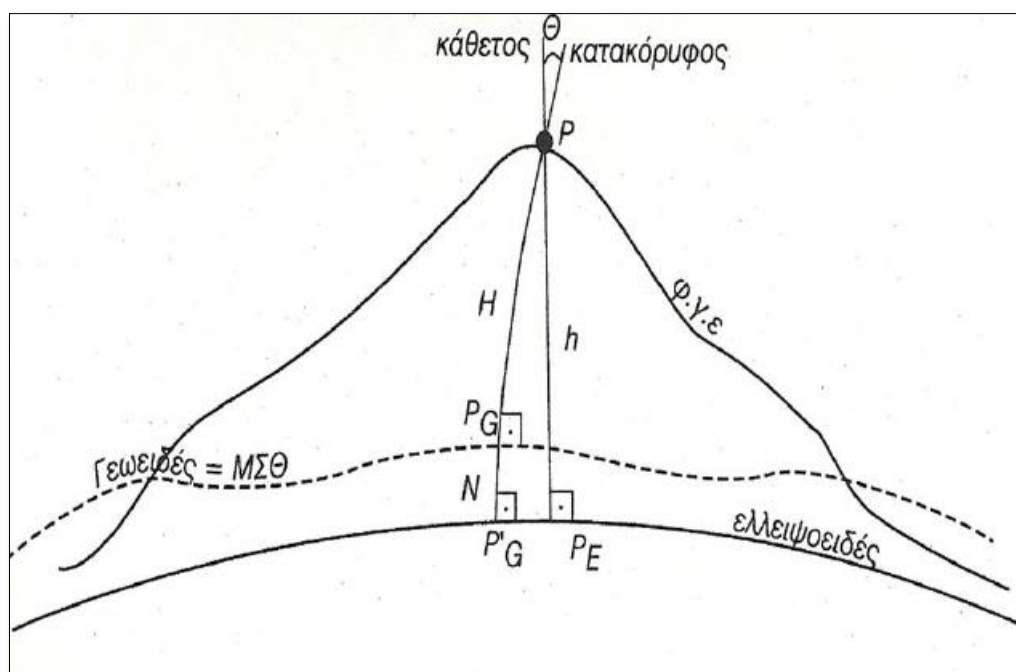
Πρόκειται για ένα διανυσματικό μέγεθος που αναλύεται σε δύο συνιστώσες (ξ : συνιστώσα της κατακορύφου κατά το αστρονομικό μήκος, η : συνιστώσα της κατακορύφου κατά το αστρονομικό πλάτος) και η οποία από φυσικής άποψης είναι η διαφορά διεύθυνσης μεταξύ των διανυσμάτων της πραγματικής βαρύτητας (g) και της κανονικής βαρύτητας (γ) της γης [Βέης Γ., κ.α., 2007].



Εικόνα 3: Γεωδαιτικές επιφάνειες αναφοράς [Πηγή: eclass.uoa.gr ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ_ΧΡΟΝΟΥ_ΚΟΣΜΑΣ_ΓΑΖΕΑΣ_2017]

3.1.2 ΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΤΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ N

Ως υψόμετρο ορίζεται η απόσταση ενός σημείου πάνω από κάποια ισοδυναμική επιφάνεια αναφοράς και αποτελεί την τρίτη διάσταση για τον προσδιορισμό της θέσης του σημείου αυτού πάνω στη ΦΓΕ. Κάθε σημείο P της ΦΓΕ αντιστοιχεί αμφιμονοσήμαντα σε ένα σημείο του ΕΕΠ P_E , το οποίο υλοποιείται με το ίχνος της καθέτου στο ελλειψοειδές που περνά από το σημείο P (ορισμός κατά Helmert) και η απόσταση P_E-P ονομάζεται γεωμετρικό υψόμετρο (h).



Εικόνα 4: Σχετική θέση επιφανειών αναφοράς και υψομέτρων [Βέης Γ., κ.α., 2007]

Αντίστοιχα ορίζεται ως ορθομετρικό υψόμετρο (H) η απόσταση P_G-P , όπου P_G το σημείο που υλοποιείται με το ίχνος της κατακορύφου στο γεωειδές που περνά από το σημείο P.

Το γεωμετρικό υψόμετρο (h) δεν είναι άμεσα μετρήσιμο, όπως το ορθομετρικό υψόμετρο (H). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι ούτε η κάθετος στο ελλειψοειδές είναι υλοποιήσιμη, εφόσον τα γεωδαιτικά όργανα υλοποιούν μόνον την κατακόρυφο, οδηγεί στην ανάγκη εισαγωγής βοηθητικών παραμέτρων και εννοιών που συνδέονται με το πεδίο βαρύτητας της Γης, δηλαδή, στην ανάγκη γνώσης του γεωειδούς μέσω των αποκλίσεων ως προς το ελλειψοειδές.

Τα ορθομετρικά υψόμετρα προσδιορίζονται με υψηλή ακρίβεια μέσω γεωμετρικών χωροσταθμήσεων, ενώ για τον υπολογισμό των γεωμετρικών υψομέτρων, δοθέντων των ορθομετρικών, είναι αναγκαία η γνώση της αποχής του γεωειδούς από το ΕΕΠ, η οποία ονομάζεται υψόμετρο γεωειδούς (N). Στην περίπτωση αναζήτησης των ορθομετρικών υψομέτρων, δοθέντων των γεωμετρικών, η γνώση των υψομέτρων του γεωειδούς είναι πάλι απαραίτητη. Τέλος η γνώση τόσο των γεωμετρικών, όσο και των ορθομετρικών υψομέτρων, μας δίνει μέσω της διαφοράς τους (αντίστοιχα) τα υψόμετρα του γεωειδούς.

Το υψόμετρο του γεωειδούς υπολογίζεται με ιδιαίτερες διαδικασίες όπως:

- Με αστρογεωδαιτική χωροστάθμηση, αφού υπολογιστούν οι συνιστώσες της απόκλισης της κατακορύφου σε κάθε σημείο, υπολογίζεται η μεταβολή ΔN σε από σημείο σε σημείο.
- Με βαρυτομετρικές μεθόδους, με μετρήσεις των ανωμαλιών της βαρύτητας.
- Με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων.

Έτσι είναι δυνατή η δημιουργία χαρτών ή μοντέλων του γεωειδούς. Χρησιμοποιώντας τέτοια στοιχεία έχουν δημιουργηθεί μοντέλα γεωειδούς για όλη τη γη- παγκόσμια γεωδυναμικά μοντέλα- χρησιμοποιώντας τα τελευταία χρόνια και δεδομένα από δορυφορική αλτιμετρία.[Λάμπρου Ε. Πανταζής Γ., 2010].

Η σχέση που συνδέει τα υψόμετρα μεταξύ τους είναι:

$$h = H + N,$$

h: Γεωμετρικό υψόμετρο (επιφάνεια αναφοράς: ελλειψοειδές)

H: Ορθομετρικό υψόμετρο (επιφάνεια αναφοράς: γεωειδές)

N: Αποχή γεωειδούς (αποχή μεταξύ των επιφανειών: ΕΕΠ – γεωειδές)

Το υψόμετρο του γεωειδούς N ακολουθείται από το πρόσημό του, ανάλογα με το αν το γεωειδές βρίσκεται πάνω (θετική τιμή) ή κάτω (αρνητική τιμή) από το ΕΕΠ. Στην πραγματικότητα το H ορίζεται κατά μήκος της καμπύλης δυναμικής γραμμής

(διεύθυνση κατακορύφου) από το σημείο της γήινης επιφάνειας μέχρι το γεωειδές και η οποία, όπως έχει αναφερθεί δεν συμπίπτει με την κάθετη στο ΕΕΠ.

Ο προσδιορισμός του υψομέτρου ενός σημείου πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας είναι αναγκαίος για τις περισσότερες γεωδαιτικές εφαρμογές. Θεωρώντας ότι η ΜΣΘ προσεγγίζει κατά το δυνατό, στην πράξη, το γεωειδές, το υψόμετρο ενός σημείου μπορεί να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με το ορθομετρικό, με μία καλή προσέγγιση. Αυτό συμβαίνει, γιατί στην πραγματικότητα για τον προσδιορισμό του «σωστού» ορθομετρικού υψομέτρου ενός σημείου, απαιτείται η γνώση του πεδίου βαρύτητας της γης, ενώ χρήζει αναγωγής μέσω μίας διόρθωσης (ορθομετρική διόρθωση). Η αναγωγή αυτή έχει νόημα να εφαρμόζεται όταν πρόκειται για δίκτυα μεγάλων υψομέτρων. Το υψόμετρο ενός τυχαίου σημείου είναι δυνατό να προσδιοριστεί με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, γνωρίζοντας την υψομετρική του διαφορά με άλλο σημείο γνωστού υψομέτρου. Η υψομετρική αυτή διαφορά, μεταξύ των σημείων, μπορεί να υπολογιστεί τόσο με επίγειες όσο και με δορυφορικές μεθόδους. Κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ορθομετρικών διαφορών μεταξύ σημείων της ΦΓΕ είναι:

- Η γεωμετρική χωροστάθμηση
- Η τριγωνομετρική υψομετρία
- Η ειδική τριγωνομετρική υψομετρία (ΕΤΥ)
- Η τριγωνομετρική υψομετρία ακριβείας (ΤΡΥΑ)
- Η βαρομετρική υψομετρία
- Η υδραυλική χωροστάθμηση

Αναφορικά με τις δορυφορικές μεθόδους σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών υψομέτρων, τα οποία προσδιορίζονται με παρατηρήσεις GPS, με σκοπό να μελετηθεί τοπικά η κλίση του γεωειδούς.

Ο υπολογισμός του υψομέτρου του γεωειδούς (N) αναφέρεται πάντοτε σε ένα συγκεκριμένο ελλειψοειδές. Ο χάρτης αποχής του γεωειδούς διαφέρει και ως προς τη μορφή και ως προς τις τιμές ανάλογα με το ελλειψοειδές και το σύστημα συντεταγμένων όπου αναφέρεται. Για παράδειγμα, είναι διαφορετική η τιμή του N σε ένα σημείο ως προς το WGS84 που χρησιμοποιεί το GRS80 γεωκεντρικό ελλειψοειδές και διαφορετική ως προς το ΕΓΣΑ87 που χρησιμοποιεί το GRS80, αλλά μετατοπισμένο ως προς το γεώκεντρο.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

Τα μοντέλα γεωειδούς που είναι διαθέσιμα αναφέρονται πλέον τόσο σε παγκόσμια όσο και σε τοπική κλίμακα. Ένα παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς υπολογίζεται ως σειρά σφαιρικών αρμονικών συντελεστών πλήρως αναπτυγμένων, σε κάποιο μέγιστο βαθμό και τάξη. Πρόκειται για αναπτύγματα σειρών του Μετασχηματισμού Fourier, οι οποίες χρησιμοποιούνται για:

- Ανάπτυξη περιοδικών συναρτήσεων
- Περιγραφή περιοδικών φαινομένων των γεωεπιστημών (π.χ. παλίρροιες, ιονοσφαιρική επίδραση στη μετάδοση των σημάτων)
- Ανάλυση και μελέτη συνεχών ή διακριτών συναρτήσεων (αρμονική ανάλυση)
- Αναλυτική έκφραση σειράς δεδομένων ενός φυσικού φαινομένου του οποίου δεν είναι γνωστή η ακριβής μαθηματική συνάρτηση.

Τα πολώνυμα (μετασχηματισμός Fourier) καθώς και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται βοηθητικά (συναρτήσεις Legendre), και κατ' επέκταση οι αρμονικές συναρτήσεις που εμφανίζονται στο ανάπτυγμα του γήινου δυναμικού σε σφαιρικές αρμονικές, περιγράφουν επακριβώς τη γεωμετρική συμπεριφορά αυτών των συναρτήσεων στην επιφάνεια της σφαιρικής θεωρούμενης Γης.

Ο αλγόριθμος του μετασχηματισμού Fourier εφαρμόζεται με επιτυχία σε πολλά γεωδαιτικά προβλήματα και αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την επιτάχυνση πολύπλοκων υπολογισμών. Για την περίπτωση προσδιορισμού του γεωειδούς σε τοπική κλίμακα η χρήση τους θεωρείται απαραίτητη για τον ταχύ υπολογισμό των τοπογραφικών διορθώσεων λόγω του ανάγλυφου της έμμεσης επίδρασης της βαρύτητας στο γεωειδές και στον προσδιορισμό του ολοκληρωματικού τύπου του Stokes. Τις τελευταίες δεκαετίες με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ακριβείς προσδιορισμούς μοντέλων γεωειδούς, συμπεριλαμβανομένης της σφαιρικότητας της πραγματικής γήινης επιφάνειας, γίνεται εφαρμογή της τεχνικής του σφαιρικού μετασχηματισμού Fourier. Με τη χρήση της τεχνικής αυτής, μπορεί να υπολογιστεί το γεωειδές σε μεγαλύτερες εκτάσεις, χωρίς την ανάγκη παραδοχών και σφαλμάτων που εισάγει η επίπεδη προσέγγιση.

Το μοντέλο αυτό παίρνει συχνά τη μορφή καννάβου όπου οι κορυφές του αντιστοιχούν σε υψόμετρα γεωειδούς (N), πάνω στα οποία εφαρμόζεται μέθοδος παρεμβολής ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών. Αυτή η μορφή καννάβου επιτρέπει την επίλυση της συμπεριφοράς του γεωειδούς ανά, περίπου, 55km. Με μία τέτοια ανάλυση ακόμα και τα πιο αξιόπιστα μοντέλα (EGM96), μπορούν να παρέχουν απόλυτη και σχετική ακρίβεια η οποία κυμαίνεται στο $\pm 1\text{m}$ και στα αρκετά εκατοστά του μέτρου αντίστοιχα.

Πρόκειται στην ουσία για γεωδυναμικά μοντέλα τα οποία δίνουν μια παγκόσμια εικόνα του πεδίου βαρύτητας, χαμηλής διακριτικής ικανότητας, καλύπτοντας με τον τρόπο αυτό τα κενά από την έλλειψη πραγματικών δεδομένων βαρύτητας.

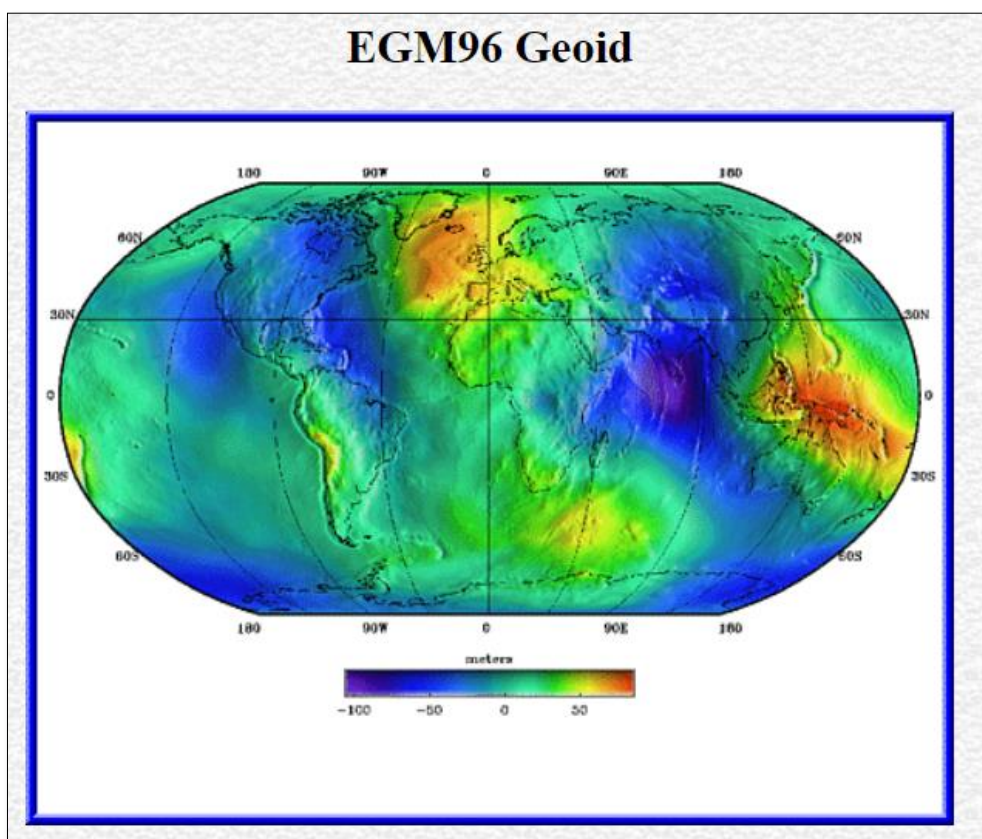
Δεδομένων των εκάστοτε αναγκών και βάσει των παρεχόμενων κάθε φορά τεχνολογιών, ο προσδιορισμός συνεχώς βελτιωμένων μοντέλων του γήινου δυναμικού στη μορφή των σφαιρικών αρμονικών, ξεκίνησε να βασίζεται ολοένα και περισσότερο στη χρήση μίας ευρείας ποικιλίας των διαφορετικών τύπων μέτρησης και των τεχνικών υπολογισμού των αντίστοιχων συντελεστών του Stokes για κάθε νέο μοντέλο. Τα μοντέλα του πεδίου βαρύτητας πρέπει να ενσωματώνουν τους ανόμοιους τύπους δεδομένων προκειμένου να υπολογιστούν οι σφαιρικοί αρμονικοί συντελεστές που περιγράφουν σε παγκόσμια κλίμακα το γήινο βαρυτικό πεδίο.

Τυπικά, τα πρώτα μοντέλα που δημιουργήθηκαν είναι τα μοντέλα GEM (Goddard Earth Model) της NASA, τα SSE (Smithsonian Standard Earth), τα GRIM (από το γεωδαιτικό Ινστιτούτο του Μονάχου), το GEM-L2 (Lerch et al.1983), το οποίο υπολογίστηκε ύστερα από 2,5 χρόνια παρατηρήσεων laser προς τον γεωδαιτικό δορυφόρο LAGEOS και άλλους 30 δορυφόρους χρησιμοποιώντας και προγενέστερα δεδομένα για το μοντέλο GEM-9 (NASA). Τέλος, τα πιο σύγχρονα μοντέλα που δημιουργήθηκαν είναι το EGM96, το EGM08 που αντικατέστησε το πρώτο, και το EIGEN- 6C4.

3.2.1 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EGM96

Η Εθνική Υπηρεσία Απεικόνισης και Χαρτογράφησης (National Imagery and mapping Agency – N.I.M.A.) κοινοποίησε τους συντελεστές του μοντέλου EGM96 (Earth Gravity Model 1996) (Pavlis et al., 1996 –1997). Το μοντέλο αυτό είναι το προϊόν βελτιωμένου συνδυασμού επίγειων και δορυφορικών μετρήσεων, ενώ για τη δημιουργία του δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα στην αναγωγή όλων των μετρήσεων στο γεωκεντρικό σύστημα WGS'84, το σύστημα του δορυφορικού συστήματος GPS. [<https://eclass.teicrete.gr>].

Πρόκειται για ένα κατακόρυφο datum που καθορίστηκε την 01 -01 -1996 και είναι κατάλληλο για Παγκόσμια χρήση [https://georepository.com/datum_5171/EGM96-geoid.html]. Παράχθηκε μέσω του γεωδυναμικού μοντέλου EGM84 και συνίσταται από ένα σύνολο ομαλοποιημένων συντελεστών σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του πεδίου βαρύτητας της γης, πλήρεις, στο βαθμό (n) και στην τάξη (m) 360. Οι σφαιρικοί αρμονικοί συντελεστές χρησιμοποιούνται σε αριθμητικούς αλγορίθμους (αριθμοσειρές) ή αλγορίθμους FFT (μετασχηματισμού Furrier), για να υπολογίσουν τις συνιστώσες της βαρύτητας σε σημεία της γήινης επιφάνειας, που εκφράζουν τη συνολική εκτροπή της κατακορύφου, διαταραχές της βαρύτητας, του διαταρακτικού δυναμικού και των δεύτερων παραγώγων του.

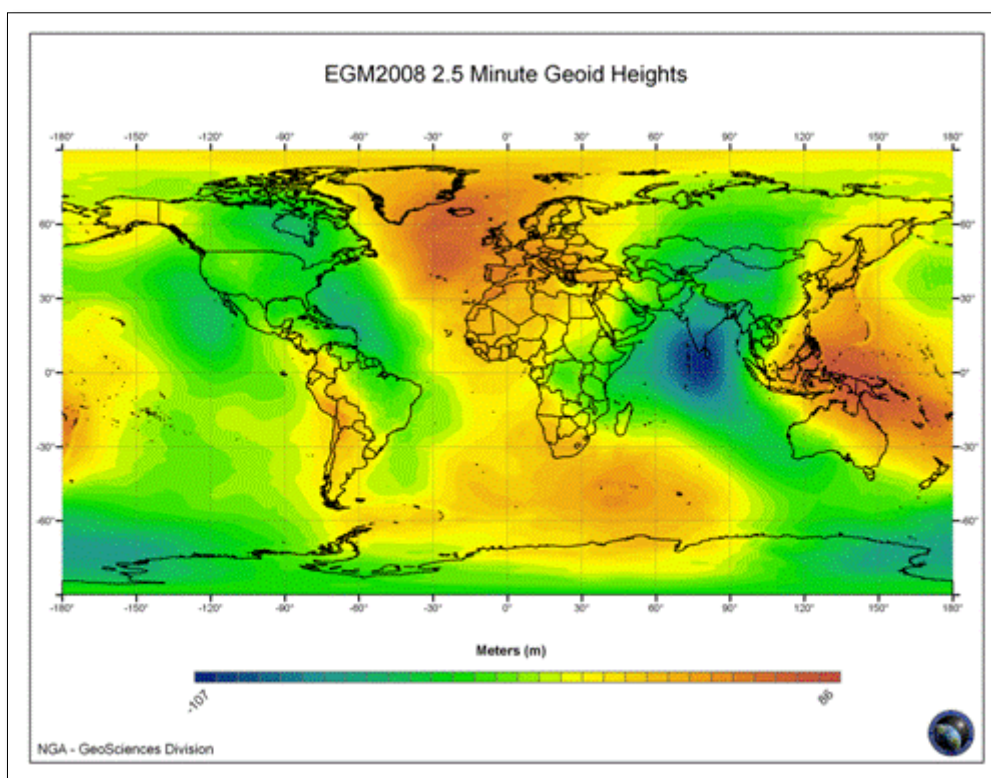


Εικόνα 5: Παγκόσμιο μοντέλου γεωειδούς EGM96 [Πηγή : <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html>]

3.2.2 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EGM08

Το επίσημο γήινο βαρυτικό μοντέλο EGM2008 (Earth Gravity Model) κυκλοφόρησε τον Ιανουάριο του 2008 από την Εθνική Υπηρεσία Γεωγραφικών Πληροφοριών των Η.Π.Α. (National Geospatial Intelligence Agency –NGA). Συνίσταται από ένα σύνολο απλοποιημένων συντελεστών σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του πεδίου βαρύτητας της γης και φτάνει να είναι πλήρες στο βαθμό (n) και σειρά (m) ίση με 2159.

Καλύπτει όλη την υφήλιο και η ανάλυσή του – περίπου 9km – ξεπερνά αισθητά αυτή που δίνει το παλαιότερο μοντέλο του '96. Αντιπροσωπεύει ένα νέο πρότυπο στην παγκόσμια προσομοίωση πεδίων βαρύτητας, αποδεικνύοντας για πρώτη φορά ότι με ακριβή και αναλυτικά δεδομένα βαρύτητας ένα παγκόσμιο μοντέλο μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών.[<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>].



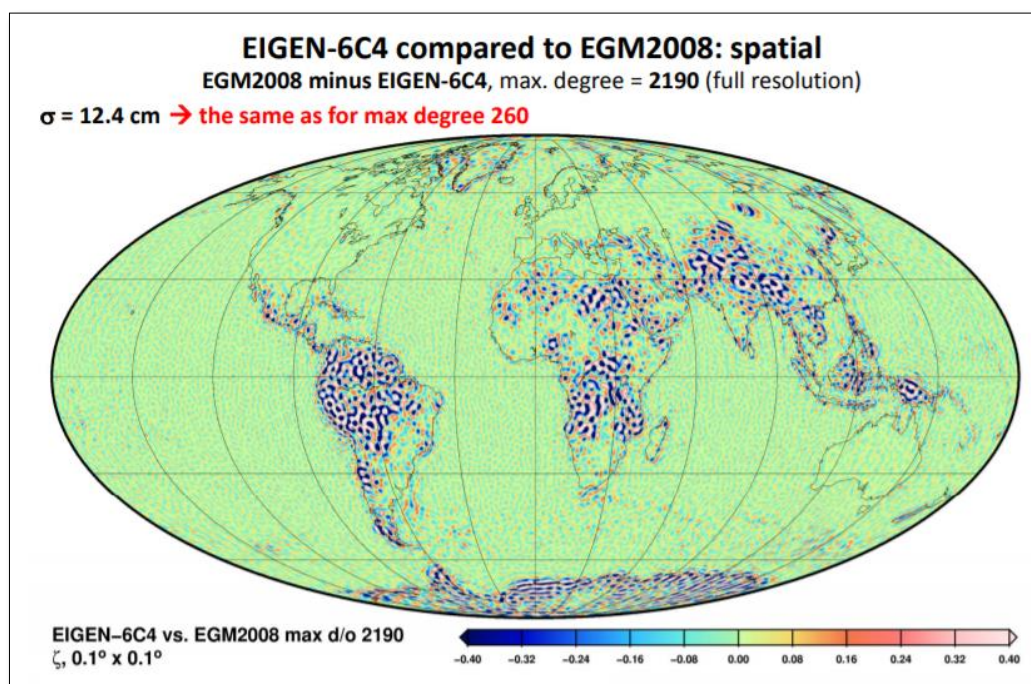
Εικόνα 6: Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM08 [Πηγή:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JB008916>]

3.2.3 ΤΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ EIGEN-6C4

Το μοντέλο EIGEN-6C4 είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο βαρύτητας υψηλής ανάλυσης. Είναι ένα από τα πρώτα μοντέλα της EIGEN (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) που έχει προκύψει από συνδυασμό δεδομένων της GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer –ESA’s operator). Ο ρόλος του είναι θεμελιώδης για την επιστήμη της Γεωδαισίας, καθώς και εύρος φυσικών επιστημών, ενώ η χρησιμοποιείται τόσο για πρακτικούς σκοπούς (καθορισμός δορυφορικής τροχιάς), όσο και για επιστημονικές εφαρμογές (διερεύνηση της δομής πυκνότητας του εσωτερικού της γης). Το νέο EIGEN κυκλοφόρησε το 2014 και καλείται EIGEN-6C4.

Το EIGEN-6C4 έχει παραχθεί, συμπεριλαμβάνοντας τα δεδομένα δορυφορικής βαρυτικής μέτρησης της GOCE (Gravity and Ocean Circulation Experiment mission, November 2009 till October 2013, see i.e. Floborghagen et al., 2011 [4], Rummel et al., 2011 [13]) και έχει μέγιστο σφαιρικό βαθμό και τάξη 2190. Κατά τη δημιουργία και μελέτη του, δόθηκε έμφαση σε τομείς όπου τα δεδομένα GOCE (complete set of gradiometry measurements after reductions) στο EIGEN-6C4 συμβάλλουν στη βελτίωση της περιγραφής του πεδίου βαρύτητας. Τα ύψη γεωειδούς GNSS/Levelling είναι ανεξάρτητη πηγή δεδομένων για την αξιολόγηση των μοντέλων πεδίου βαρύτητας. Επομένως, για την αξιολόγηση του EIGEN-6C4, χρησιμοποιούμε σετ δεδομένων (υψομετρικών) GNSS/Levelling σε εδάφη της Ευρώπης, των ΗΠΑ, του Καναδά, της Βραζιλίας, της Ιαπωνίας, της Τσεχίας και της Σλοβακίας.[www.researchgate.net].



Εικόνα 7: Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EIGEN -6C4 [Πηγή: <http://icgem.gfz-potsdam.de/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>]

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν σχετικά με τα στοιχεία- παραμέτρους των μοντέλων, σημειώνεται ότι η σημαντικότερη διάκρισή τους έγκειται στη σειρά και το βαθμό του σφαιρικού πολυωνύμου του μετασχηματισμού Fourier. Με το πέρασμα των χρόνων παρατηρείται ότι και τα δύο αυτά στοιχεία αυξάνονται προκειμένου το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να έχει την καλύτερη δυνατή ακρίβεια (υψομετρικά και οριζοντιογραφικά).

Τα δύο μοντέλα EGM96 και '08 συνίστανται από ομαλοποιημένους συντελεστές σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων και απλοποιημένους συντελεστές σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων του πεδίου βαρύτητας της γης αντίστοιχα, και έχουν προκύψει από επίγειες και δορυφορικές μετρήσεις. Σχετικά με το EIGEN-6C4, είναι αποτέλεσμα συνδυασμού δεδομένων και για το λόγο αυτό δίνει καλύτερο, από άποψη ακρίβειας, αποτέλεσμα.

Στην πράξη ο μέγιστος βαθμός που αναπτύσσονται τα πολυώνυμα, και συνεπώς διακόπτεται το ανάπτυγμα του γήινου δυναμικού σε σφαιρικές αρμονικές, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό των σφαιρικών αρμονικών, όπως είναι τα ύψη της τροχιάς των εκάστοτε δορυφόρων, ο αριθμός των παρατηρήσεων που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό των σφαιρικών αρμονικών συντελεστών και η ομοιογένεια της κατανομής των δορυφόρων γύρω από τη Γη, από τους οποίους προέρχονται οι εν λόγω παρατηρήσεις. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο βαθμός και η τάξη του αναπτύγματος σε σφαιρικές αρμονικές, τόσο καλύτερα θα είναι τα αποτελέσματα που θα ληφθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΑΡΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΓΕΩΕΙΔΕΣ

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα προηγούμενα, η βαρύτητα, καθώς και οι μέθοδοι προσδιορισμού της αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο για τη δημιουργία και κατανόηση των μοντέλων γεωειδούς.

Στην πράξη γίνεται προσπάθεια προσέγγισης ή και πλήρους προσδιορισμού της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε διάφορα σημεία της γήινης επιφάνειας ώστε το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να ανταποκρίνεται στο πραγματικό της σχήμα. Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι μία ποσότητα που έχει διαφορετική τιμή από ένα μέρος σε ένα άλλο και που επίσης, σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση μεταβάλλεται με το χρόνο. Για μετρολογικούς λόγους η τιμή του g (επιτάχυνση βαρύτητας) μπορεί να θεωρηθεί ως τοπική φυσική σταθερά, σε αντίθεση με άλλες επιστημονικές εφαρμογές που καθιστούν απαραίτητο τον υπολογισμό σχετικών τιμών (δηλ. της διαφοράς των τιμών της βαρύτητας) σε διάφορα σημεία ανά τον κόσμο. Αυτός ο στόχος μπορεί στις μέρες μας να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τα αναπτυγμένα απόλυτα βαρυτήμετρα (ή βαρυτόμετρα) των οποίων η ακρίβεια είναι ικανοποιητική (μερικά μέρη στα 10^9). [Δεληκαράογλου Δ., 2007].

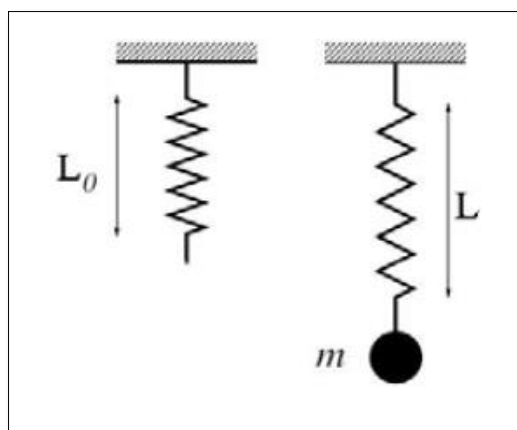
Η βαρυτημετρία/βαρυτομετρία αποτελεί το μέρος εκείνο της Φυσικής Γεωδαισίας που ασχολείται με τις πρακτικές μεθοδολογίες των μετρήσεων βαρύτητας για γεωδαιτικές, γεωφυσικές ή άλλες εφαρμογές. Με τη βοήθεια των σύγχρονων τεχνικών, πέραν του προσδιορισμού του μέτρου του διανύσματος ή της έντασης της βαρύτητας, μπορούμε να κάνουμε λόγω για διανυσματική βαρυτημετρία, δηλαδή για μεθοδολογίες που επιτρέπουν και την ακριβή μέτρηση της διεύθυνσης του διανύσματος της βαρύτητας.

Γενικά, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, διακρίνονται σε απόλυτα και σε σχετικά και ανάλογα χαρακτηρίζονται και οι μετρήσεις που προκύπτουν από αυτά. Απόλυτες μετρήσεις της βαρύτητας προκύπτουν από ειδικές μετρητικές διατάξεις που προσδιορίζουν την ένταση (τιμή) της βαρύτητας σε ένα σημείο από μετρήσεις του μήκους ή/και του χρόνου. Οι μετρητικές διατάξεις που στηρίζονται στην αρχή λειτουργίας των εκκρεμών ή στην ελεύθερη πτώση των σωμάτων ανήκουν κυρίως σε αυτή την κατηγορία. Σχετικές μετρήσεις της βαρύτητας αναφέρονται σε διαφορές της τιμής της βαρύτητας στα σημεία ενδιαφέροντος σε σχέση με την απόλυτη τιμή της βαρύτητας σε ένα ή περισσότερα γνωστά σημεία αναφοράς. Πρακτικά η εκτέλεση σχετικών μετρήσεων της βαρύτητας αποτελεί μία πιο εύκολη διαδικασία από την αντίστοιχη της μέτρησης της απόλυτης βαρύτητας. Στη δεύτερη αυτή κατηγορία ανήκουν, συνήθως, οι μετρητικές διατάξεις που στηρίζονται στην αρχή της παραμόρφωσης ελατηρίων.[Δεληκαράογλου Δ., 2007].

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορούν σε σχετικές μετρήσεις βαρύτητας, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί η αρχή της παραμόρφωσης των ελατηρίων, καθώς κατά το στάδιο της επεξεργασίας χρειάστηκε να εντοπιστεί και προσδιορισθεί η παραμόρφωση αυτή προκειμένου να προσδιοριστούν ορθά οι ανηγμένες τιμές της σχετικής βαρύτητας.

4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ

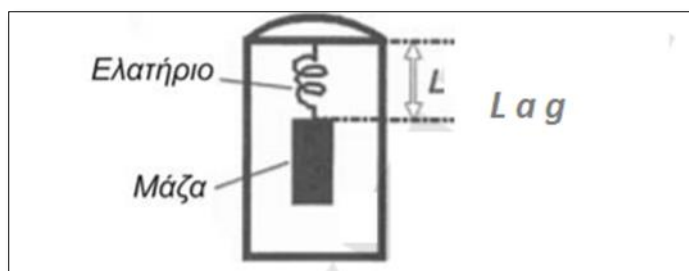
Ένα από τα πιο απλά συστήματα αρμονικών ταλαντώσεων είναι η μετρητική διάταξη που φαίνεται στην Εικ. 8.



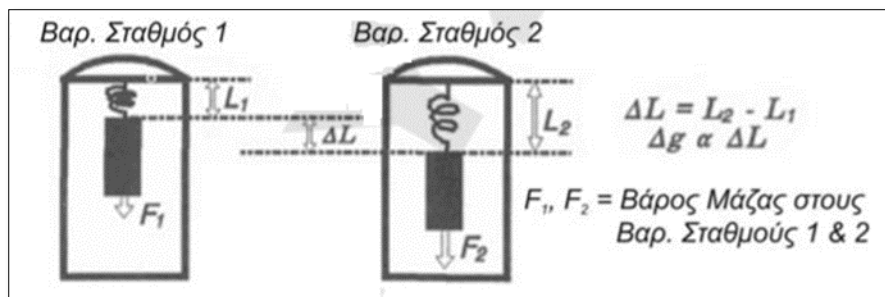
Εικόνα 8: Μέτρηση της βαρύτητας μέσω της παραμόρφωσης ενός ελατηρίου [Πηγή: Δ. Δεληκαράογλου 2007]

Εάν μια μάζα m (π.χ. ένα σφαιρίδιο) κρεμαστεί από το ελεύθερο άκρο ενός (ακλόνητου στο άλλο άκρο του) κατακόρυφου αβαρούς ελατηρίου, η δύναμη της βαρύτητας που ενεργεί στο ελατήριο, εξαιτίας της μάζας, προκαλεί μια παραμόρφωση του ελατηρίου που εκφράζεται υπό τη μορφή μιας επιμήκυνσής του. Συνεπώς, αν ένα τέτοιο σύστημα υλοποιείται σε μια μετρητική διάταξη, μετρώντας την επιμήκυνση ενός ελατηρίου από τη θέση ισορροπίας του, εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας, μπορεί να υπολογιστεί η ένταση της βαρύτητας.

Ένα τέτοιο σύστημα: ελατήριο – μάζα υπάρχει στο εσωτερικό ενός βαρυτόμετρου. Όταν το βαρυτόμετρο μεταφέρεται από ένα σταθμό σε έναν άλλο, η δύναμη (F) την οποία η μάζα (m) ασκεί στο ελατήριο ποικίλει ανάλογα με την τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας (g): $F = mg$ και $g = F/m$. Με άλλα λόγια, η μάζα θα ζυγίζει περισσότερο ή λιγότερο, εξαρτώμενη από την έλξη της βαρύτητας (g) στο σταθμό μέτρησης. Το βαρυτόμετρο ζυγίζει πρακτικά μία μάζα σε διαφορετικούς σταθμούς. Το ελατήριο τεντώνεται ($+\Delta L$) όπου υπάρχει μεγαλύτερη βαρύτητα και συρρικνώνεται ($-\Delta L$), όπου η βαρύτητα είναι μικρότερη. [Αλεξόπουλος Ι., 2008].



Εικόνα 9: Λειτουργία βαρυτόμετρου (Α)



Εικόνα 10: Λειτουργία βαρυτόμετρου (Β)

Παραπάνω απεικονίζεται η αναλογία του μήκους του ελατηρίου προς τη βαρύτητα (Α) και η επιρροή που έχει μία δύναμη F_1 ή F_2 στην μεταβολή του μήκους του ελατηρίου (Β). Η δύναμη που ασκείται στη μάζα είναι μια συνάρτηση του g . Η αλλαγή στο μήκος του ελατηρίου (ΔL), είναι έτσι ανάλογη προς τη μεταβολή της βαρύτητας (Δg).

Η μεταβολή της βαρύτητας (Δg), δηλαδή η σχετική τιμή της βαρύτητας, έχει σχέση εξάρτησης με το σημείο γνωστής βαρύτητας, βάσει του οποίου προσδιορίζονται οι τιμές (ένταση) της επιτάχυνσης της βαρύτητας στους σταθμούς μέτρησης. [<http://users.uoa.gr/~jalexopoulos/varytita.pdf>].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ GPS ΣΤΙΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το σύστημα NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging, Global Positioning System) ή απλά GPS, είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας, οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης (ξηράς, θάλασσα, αέρα) και στο εγγύς διάστημα, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ανεξάρτητα από καιρικές συνθήκες.[Αριστείδης Ι. Φωτίου, Χρήστος Κ. Πικριδάς, 2012].

Πρόκειται για ένα σύστημα που σχεδιάστηκε στη δεκαετία του 1970, αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980 και εκ τότε έχει βελτιωθεί και βελτιώνεται, παράλληλα με την τεχνολογική πρόοδο, προσφέροντας τις υπηρεσίες του στους επιστημονικούς και μη κλάδους.

Το GPS ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων GNSS (Global Navigation Satellite Systems), δηλαδή των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης, όπως είναι το παρόμοιο Ρωσικό σύστημα GLONASS (Global Navigation Satellite Systems), το καθαρά πολιτικό Ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO, καθώς και το Κινέζικο σύστημα πλοήγησης BeiDou. Οι σύγχρονοι δέκτες (γεωδαιτικοί) GPS κατασκευάζονται με τη δυνατότητα να λαμβάνουν δορυφορικά σήματα GPS και GLONASS, και σταδιακά GALILEO, βελτιώνοντας περισσότερο την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα των συστημάτων. Το σύστημα GPS είναι αυτό που έχει επικρατήσει στο μεγαλύτερο μέρος των γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών, εξελίσσοντας το αντικείμενό τους.

5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ GPS

Όσον αφορά στις γεωδαιτικές- τοπογραφικές εργασίες, ένας δέκτης GPS μπορεί να αναπτύσσεται όπως ένα κλασσικό τοπογραφικό- γεωδαιτικό όργανο σε τρίποδα, βάθρο, στυλεό, να τοποθετείται σε κινούμενο όχημα (πλοίο, αεροπλάνο, ελικόπτερο, τρένο, αυτοκίνητο, κλπ.) ή ακόμη και να κρατιέται στην παλάμη του χεριού λαμβάνοντας ηλεκτρομαγνητικά σήματα που εκπέμπονται από τους ορατούς ως προς το δέκτη δορυφόρους.

Τα σήματα αυτά περιέχουν πληροφορία που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μετρήσεων, οι οποίες ισοδυναμούν με αποστάσεις μεταξύ δέκτη- δορυφόρου σε κάθε χρονική στιγμή, ακρίβειας ανάλογης του μετρητικού σήματος που παρατηρείται (από 3m έως και 2mm). Τα σήματα που λαμβάνει ο δέκτης από τους δορυφόρους αποθηκεύονται στη μνήμη του και κατόπιν επεξεργασίας, εσωτερικά από το λογισμικό του δέκτη σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων (εργασίες γραφείου), παρέχουν τη θέση (συντεταγμένες) ή και την ταχύτητα και το χρόνο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο δέκτης πέραν του σήματος, λαμβάνει και επιπλέον πληροφορίες που αφορούν στοιχεία της τροχιάς των δορυφόρων, μέσω των οποίων υπολογίζονται οι

συντεταγμένες, οι παράμετροι διόρθωσης χρόνου, καθώς και άλλα συστηματικά σφάλματα ώστε τελικά να υπολογιστεί η θέση ή το λεγόμενο στίγμα (συντεταγμένες).

Κάνοντας λόγο για μετρήσεις, σημειώνεται ότι αυτές γίνονται πάνω σε μετρητικούς κώδικες και σε ημιτονοειδή κύματα -φορείς των κωδικών και του μηνύματος πλοήγησης. Οι μετρήσεις αυτές είναι πάντοτε επηρεασμένες από συστηματικά σφάλματα που οφείλονται κυρίως:

- Στον μη συγχρονισμό των ταλαντωτών/χρονομέτρων (ρολογιών) των δορυφόρων και των δεκτών,
- στην επίδραση της ατμόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα κατά τη διαδρομή του (ιονοσφαιρική, τροποσφαιρική επίδραση).

Τα σφάλματα αυτά αντιμετωπίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τη βοήθεια κατάλληλων μοντέλων ή απαλείφονται μέσω της εφαρμογής ειδικών τεχνικών επεξεργασίας των μετρήσεων. Το πρόβλημα του προσδιορισμού αυτού του είδους σφαλμάτων καθώς και η επιτυχής αντιμετώπισή του είναι καθοριστικής σημασίας για την ποιότητα/ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GPS

Ο προσδιορισμός θέσης με το σύστημα GPS ή με ένα σύστημα GNSS διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

- Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης και
- Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης.

Ο προσδιορισμός αυτός είναι δυνατό να γίνεται είτε εκ των υστέρων των μετρήσεων (post processing) ή σε πραγματικό χρόνο (real time), ανάλογα της εφαρμογής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε ο σχετικός στατικός προσδιορισμός θέσης (relative positioning) κατά τον οποίο προσδιορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο, του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές ως προς το σύστημα αναφοράς WGS84 ή ένα σύστημα που διαφέρει λίγο (της τάξης των μερικών μέτρων) από το WGS84.

Προϋπόθεση της σωστής υλοποίησης της διαδικασίας είναι η εκτέλεση ταυτόχρονων παρατηρήσεων από τους δύο δέκτες στα αντίστοιχα σημεία προς τους ίδιους δορυφόρους. Αποτέλεσμα των παρατηρήσεων αυτών είναι ο προσδιορισμός, με υψηλή ακρίβεια, της σχετικής θέσης, δηλαδή των διαφορών των συντεταγμένων μεταξύ των σημείων (διάνυσμα βάσης) και όχι οι απόλυτες τιμές του άγνωστου σημείου, η ακρίβεια του οποίου εξαρτάται από την ακρίβεια των συντεταγμένων του γνωστού. Με την ίδια λογική, ο σχετικός προσδιορισμός θέσης μπορεί να αφορά στην

ταυτόχρονη μέτρηση σε περισσότερα των δύο σημείων, από αντίστοιχο αριθμό δεκτών και κατά συνέπεια τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης μεταξύ όλων των σημείων.[Αριστείδης Ι. Φωτίου, Χρήστος Κ. Πικριδάς, 2012].

Μία ακόμη διάκριση του προσδιορισμού της θέσης γίνεται με βάση την κίνηση των δεκτών κατά τη διάρκεια των δορυφορικών παρατηρήσεων. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για τον:

- στατικό (static) προσδιορισμό και
- κινηματικό (kinematic) προσδιορισμό θέσης,

ανάλογα με το αν το «αντικείμενο» που υπόκειται σε προσδιορισμό θέσης είναι κινητό ή όχι.

5.3 ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΣΤΟ GPS

Με τη χρήση του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού γίνεται ο προσδιορισμός διανυσμάτων βάσης της μορφής ΔX , ΔY , ΔZ . Ο υπολογισμός της θέσης, όπως έχει αναφερθεί, γίνεται στις τρεις διαστάσεις και συνεπώς η πληροφορία του υψομέτρου εμπεριέχεται στη λύση του συστήματος. Κατά το στάδιο της επεξεργασίας, γίνεται ο διαχωρισμός και προκύπτουν οι ζητούμενες Γεωδαιτικές συντεταγμένες (ϕ , λ , h).

Το σφάλμα που δίνει η χρήση του GPS στα υψόμετρα είναι μίας τάξης μεγαλύτερο του σφάλματος προσδιορισμού οριζοντιογραφικών συντεταγμένων, εξαιτίας κυρίως της γεωμετρίας των δορυφόρων που παρατηρούνται. Όσο «καλύτερη» είναι η γεωμετρία των παρατηρούμενων δορυφόρων, παρατηρείται μία βελτίωση της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό του υψομέτρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να συλλεχθεί ο απαραίτητος όγκος δεδομένων για τον προσδιορισμό ενός τοπικού μοντέλου γεωειδούς, καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή τους. Βάσει των όσων προηγήθηκαν σχετικά με την επιφάνεια του γεωειδούς και τους τρόπους με τους οποίους προσεγγίζεται, πραγματοποιήθηκαν εκείνες οι εργασίες πεδίου που αποβλέπουν στον προσδιορισμό των υψομέτρων, ορθομετρικών και γεωμετρικών, προκειμένου να υπολογιστούν στη συνέχεια τα υψόμετρα του γεωειδούς (N).

6.1 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου και βρίσκεται στη βορειοανατολική Αττική, πλησίον της περιοχής της Νέας Μάκρης.

Για την έναρξη των εργασιών πεδίου, χρειάστηκε σε πρώτο στάδιο να αναγνωριστεί η περιοχή εκπόνησής τους. Το ΚΔΔ βρίσκεται στην Αττική και συγκεκριμένα στις βορειοανατολικές πλαγιές της Πεντέλης σε απόσταση 25, περίπου, χιλιομέτρων από το κέντρο της Αθήνας και σε υψόμετρο 480 μέτρων. Η έκταση της υπό μελέτη περιοχής προσεγγίζει τα 32 στρέμματα και στο σύνολό της χαρακτηρίζεται από μέτριο σχετικά ανάγλυφο, συγκριτικά με την ευρύτερη περιοχή στην οποία επικρατεί πιο έντονο.



Εικόνα 11: Περιοχή μελέτης (Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου)

6.1.1 ΙΔΡΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το στάδιο της αναγνώρισης του πεδίου εργασίας, ακολούθησε η αναζήτηση των σημείων, για υλοποίηση στο έδαφος που θα αποτελέσουν τις κορυφές στο δίκτυο ελέγχου. Τα σημεία που τελικά επιλέχθηκαν είναι δώδεκα (12) σε αριθμό και η σήμανσή τους, επί του εδάφους, έγινε με τη βοήθεια καρφιών.

Τα σημεία του εδάφους επιδιώχθηκε να τοποθετηθούν σε θέσεις που να ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

1. Καλός ορίζοντας.
2. Απομακρυσμένα από εμπόδια και πηγές παρεμβολών.
3. Εύκολη προσβασιμότητα.
4. Δύσκολη εξαγωγή ή μετακίνησή τους.
5. Περιμετρική και ομοιόμορφη εσωτερική κάλυψη της υπό μελέτη περιοχής.



Εικόνα 12: Υλοποιημένα σημεία εδάφους

Από τα σημεία που απεικονίζονται παραπάνω, το σημείο DIONA ήταν ήδη υλοποιημένο στην περιοχή που μελετάται. Επιπλέον, στο ΚΔΔ υπάρχουν έξι (6) υλοποιημένες, με ορειχάλκινα μπουλόνια, υψομετρικές αφετηρίες που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να δοθούν, μέσω της γεωμετρικής χωροστάθμησης ορθομετρικά υψόμετρα στα σημεία εδάφους που επιλέχθηκαν (Εικ. 13).



Εικόνα 13: Υπάρχουσες υψομετρικές αφετηρίες (Reper)

Οι υψομετρικές αυτές αφετηρίες είναι εύκολα διακριτές δεδομένης της κατασκευής τους (ορειχάλκινα μπουλόνια), ενώ οι πιθανότητες μετακίνησης ή αποκόλλησής τους είναι ελάχιστες. Η μορφή σήμανσής τους απεικονίζεται στην Εικ. 14:



Εικόνα 14: Πρότυπη απεικόνιση υψομετρικής αφετηρίας

6.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

6.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗ

Από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον προσδιορισμό των ορθομετρικών υψομέτρων εφαρμόστηκε αυτής της Γεωμετρικής Χωροστάθμησης. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαραίτητος ήταν ο εξής εξοπλισμός:

- *Ψηφιακός χωροβάτης*: όργανο που αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο το οποίο περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα και επομένως διαγράφει ένα οριζόντιο επίπεδο. Το μοντέλο του χωροβάτη που χρησιμοποιήθηκε είναι το Sprinter 150M και η υψομετρική του ακρίβεια φτάνει το 1.5mm/km.
- *2 χωροσταθμικές σταδίες*: Το επίπεδο που προαναφέρθηκε «τέμνει» οπτικά τις δύο κατακόρυφες σταδίες (αριθμημένοι πήχεις) στα σημεία Α (αφετηρία) και Β (τέλος διαδρομής). Οι διαφορές των αναγνώσεων τους Όπισθεν και Έμπροσθεν αντίστοιχα, δίνουν την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων, με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει και το $\pm 1\text{mm/km}$.
- *2 χωροσταθμικές βάσεις (χελώνες)*: χρησιμοποιούνται όταν η απόσταση μεταξύ των σημείων είναι μεγάλη και απαιτούνται περισσότερες από μία ενδιάμεσες στάσεις.
- *1 Τρίποδας*.

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην υλοποίηση στο χώρο ενός οριζόντιου επιπέδου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός χωροβάτης, ο οποίος μπορεί να οριζοντιώνει με μεγάλη ακρίβεια τη σκοπευτική του γραμμή, υλοποιώντας κατά την περιστροφή της γύρω από τον πρωτεύοντα άξονά του ένα οριζόντιο επίπεδο. Για τη λήψη των μετρήσεων, χρησιμοποιούνται οι δύο αριθμημένες χωροσταθμικές πήχεις που τοποθετούνται κατακόρυφα στα σημεία που ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της υψομετρικής τους διαφοράς. Η ορθομετρική διαφορά μεταξύ δύο σημείων Α και Β είναι ίση με:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = O - E,$$

όπου ΔH_{AB} : Υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων Α και Β

H_A : το υψόμετρο της χωροσταθμικής επιφάνειας που διέρχεται από το σημείο Α

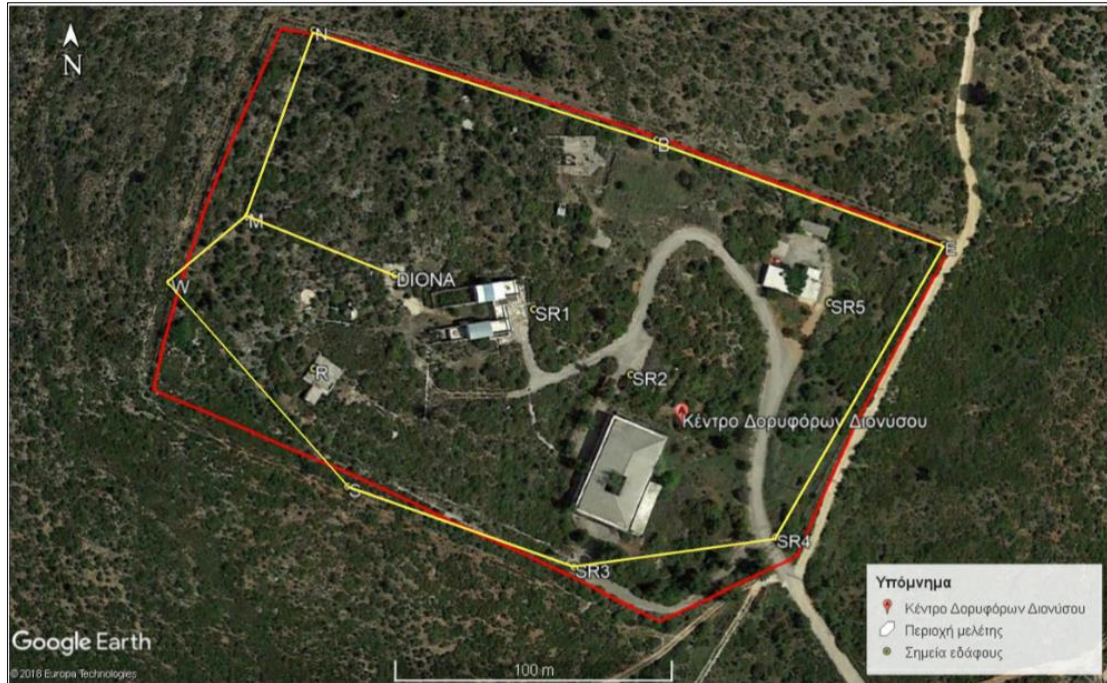
H_B : το υψόμετρο της χωροσταθμικής επιφάνειας που διέρχεται από το σημείο Β

O : όπισθεν σκόπευση

E : έμπροσθεν σκόπευση

Η διαδικασία των μετρήσεων ολοκληρώθηκε εντός δύο ημερών 10/04/2019 και 18/04/2019 και η διαδρομή που ακολουθήθηκε στις μέρες αυτές παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες με κίτρινη σήμανση.

- 10/04/2019



Εικόνα 15: Διαδρομή γεωμετρικής χωροστάθμησης

Αφετηρία των μετρήσεων αποτέλεσε η υψομετρική αφετηρία SR4 και η διαδρομή που ακολουθήθηκε είναι: SR4 -> E -> B -> N -> M -> N -> S -> SR3 -> SR4.

- 18/04/2019



Εικόνα 16: Διαδρομές γεωμετρικής χωροστάθμησης

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν την εν λόγω ημέρα συνδέουν τις εξής υψομετρικές αφετηρίες με τα σημεία εδάφους: SR2 -> B, SR1 -> R, R -> M, R -> DIONA και B ->SR5.

Οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ειδικά έντυπα χωροστάθμησης, τα οποία στη συνέχεια αναλύθηκαν προκειμένου να προσδιοριστούν οι ζητούμενες υψομετρικές διαφορές.

6.2.2 GPS

Οι μετρήσεις GPS που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης είχαν διάρκεια τριών ημερών και πραγματοποιήθηκαν στις 14 με 16 Νοέμβρη 2018.

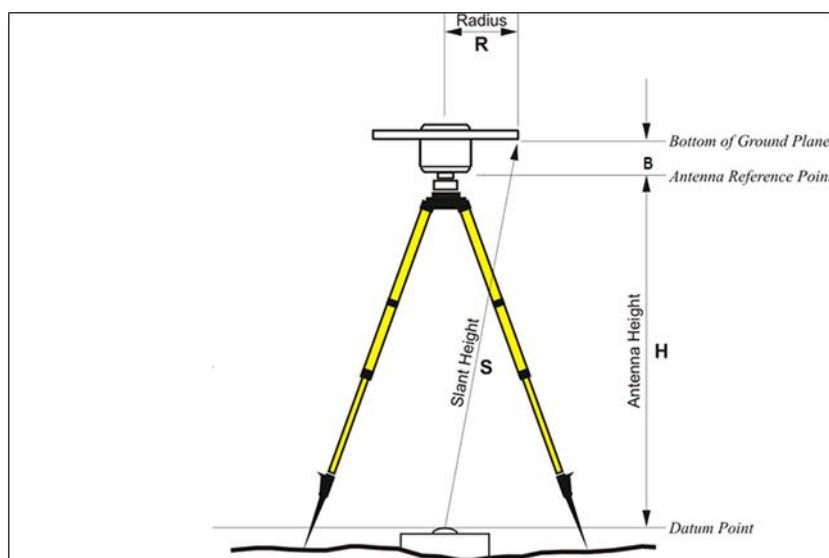
Η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι αυτή του σχετικού στατικού εντοπισμού, καθώς στο πεδίο εργασίας βρίσκεται το σημείο DYNNG, για το οποίο έχουν υπολογιστεί, στο παρελθόν, με καλή ακρίβεια οι συντεταγμένες του. Το σημείο αυτό βρίσκεται πλησίον του υλοποιημένου σημείου DIONA και της υψομετρικής αφετηρίας R_{cp} .

Για την έναρξη της διαδικασίας των μετρήσεων- παρατηρήσεων GPS έγινε μία κατάλληλη προετοιμασία και σχεδιασμός για την ορθότερη εκτέλεσή τους.

Η προετοιμασία αυτή αφορά κατά κύριο λόγο τα εξής:

- Επιλογή των δεκτών (τύπος, αριθμός)
- Χρήση κατάλληλων εντύπων υπαίθρου, για καταγραφή των απαραίτητων στοιχείων των μετρήσεων:
 1. Όνομα σημείου
 2. Έναρξη- πέρας μέτρησης
 3. Ύψος κεραίας
 4. Προσεγγιστική θέση

Από τα παραπάνω ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις μετρήσεις των υψών της κεραίας. Σε κάθε τύπο κεραίας που χρησιμοποιήθηκε η μέτρηση του ύψους γινόταν στο προτεινόμενο από τον κατασκευαστή σημείο, και εκ των υστέρων έγιναν οι κατάλληλες αναγωγές για την επεξεργασία των μετρήσεων στη βάση τους (BOAM: Bottom Of Antenna Mount). Ενδεικτικά για κάθε τύπο κεραίας ισχύουν τα αναγραφόμενα στην Εικ. 17.



Εικόνα 17: Πρότυπη γεωμετρία μέτρησης/αναγωγής ύψους κεραίας (Πηγή: GPS for Land Surveyors <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1853>)

Για την υλοποίηση των μετρήσεων GPS, χρησιμοποιήθηκαν δέκτες δύο εταιριών:

- 2 δέκτες της εταιρίας TRIMBLE
- 1 δέκτης της εταιρίας JAVAD

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κεραιών, και συγκεκριμένα αυτά που σχετίζονται με τις διαστάσεις τους, σημειώνεται ότι προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια και για να εξαλειφθούν σχετικά σφάλματα, αντικαταστάθηκαν οι, δοσμένες από τον κατασκευαστή, τιμές των παραμέτρων L1 και L2, ώστε να προσδιοριστεί η ακριβής θέση των κέντρων φάσης τους. Οι τροποποιημένες τιμές προέκυψαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από την IGS Antenna Working Group.

6.2.2.1 ΔΕΚΤΕΣ GPS

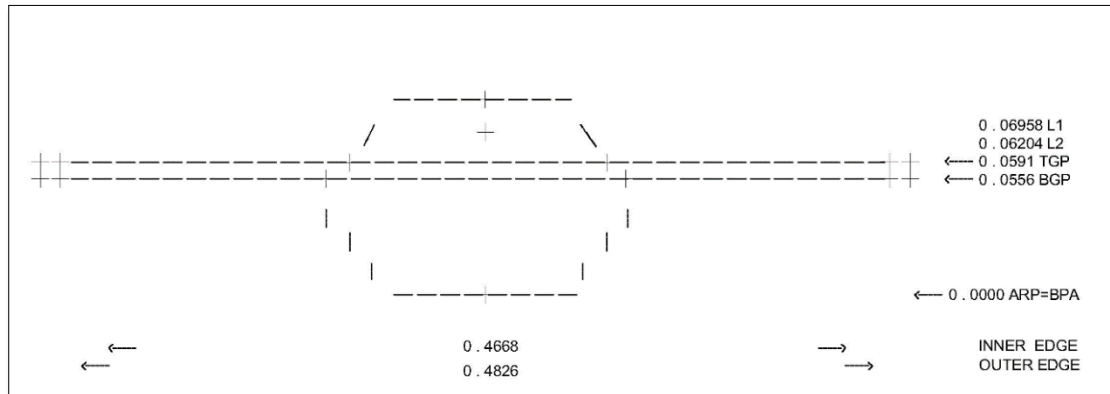
TRIMBLE

Trimble 4000ssi

Η κεραία του παρόντος δέκτη είναι η Micro centered (L1/L2) (με αποκοπή πλάκας). Πρόκειται για ένα δέκτη που παρέχει υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης, καθώς και στην πλοήγηση. Αυτόματα εντοπίζουν και παρακολουθούν δορυφόρους GPS στα κανάλια L1 και L2. Ακόμη, συνδυάζουν χαμηλού θορύβου μετρήσεις C/A κώδικα με τεχνικές φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης παρέχοντας ακριβή στοιχεία για τη θέση, την ταχύτητα και λύσεις χρόνου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κεραίας που

αναγράφονται στην Εικ. 18, είναι τα διορθωμένα, όπως αυτά δίνονται από την IGS Antenna Working Group.

[<http://cody.inlandgps.com/pub/Trimble%20Stuff/From%20Trimble/Documentation/4000%20Series/4000SSI%20User%20Guide%20199502.pdf>]



Εικόνα 18: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Trimble 4000ssi

Η κεραία, μαζί με τον αντίστοιχο δέκτη της απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί:

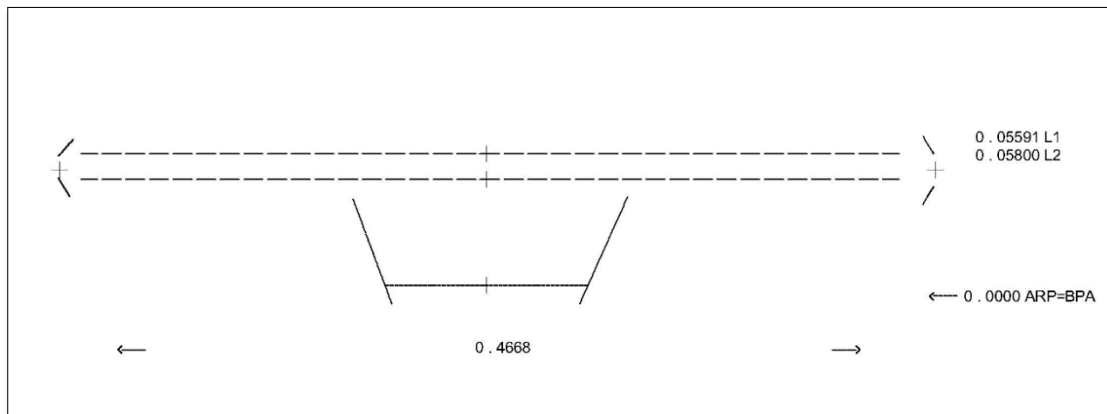


Εικόνα 19: Κεραία και δέκτης της σειράς Trimble 4000ssi

Trimble 4700

Η κεραία του Trimble 4700 είναι η Zephyr (με πλάκα αποκοπής). Ο δέκτης 4700 παρακολουθεί τον κώδικα L1 C / A και είναι διπλής συχνότητας. Έχει όμοιες ιδιότητες με τον δέκτη της σειράς 4000ssi. [<https://www.manualslib.com>].

Ο δέκτης συλλέγει τα πρωτογενή δεδομένα και τα αποθηκεύει στην εσωτερική μνήμη του προκειμένου να γίνει η εκ των υστέρων επεξεργασία τους για τον τελικό προσδιορισμό των γεωγραφικών τους συντεταγμένων.



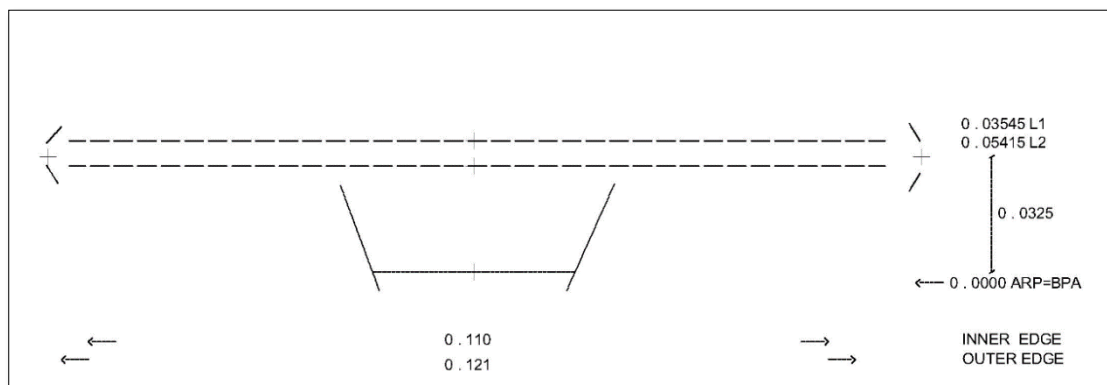
Εικόνα 20: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Trimble 4700



Εικόνα 21: Κεραία και δέκτης της σειράς Trimble 4700

JAVAD

Οι δέκτες της εταιρείας Javad είναι τύπου Legacy, διαθέτουν 20 κανάλια και είναι δέκτες διπλής συχνότητας και μπορούν να λαμβάνουν και σήματα από το ρωσικό δορυφορικό σύστημα GLONASS. Η κεραία είναι της ίδιας εταιρείας τύπου Legant και έχει την ικανότητα να δέχεται σήματα μόνο από τα δορυφορικά συστήματα GPS και GLONASS απορρίπτοντας οποιαδήποτε άλλα σήματα αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αύξηση του θορύβου στις μετρήσεις.



Εικόνα 22: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραίας Javad

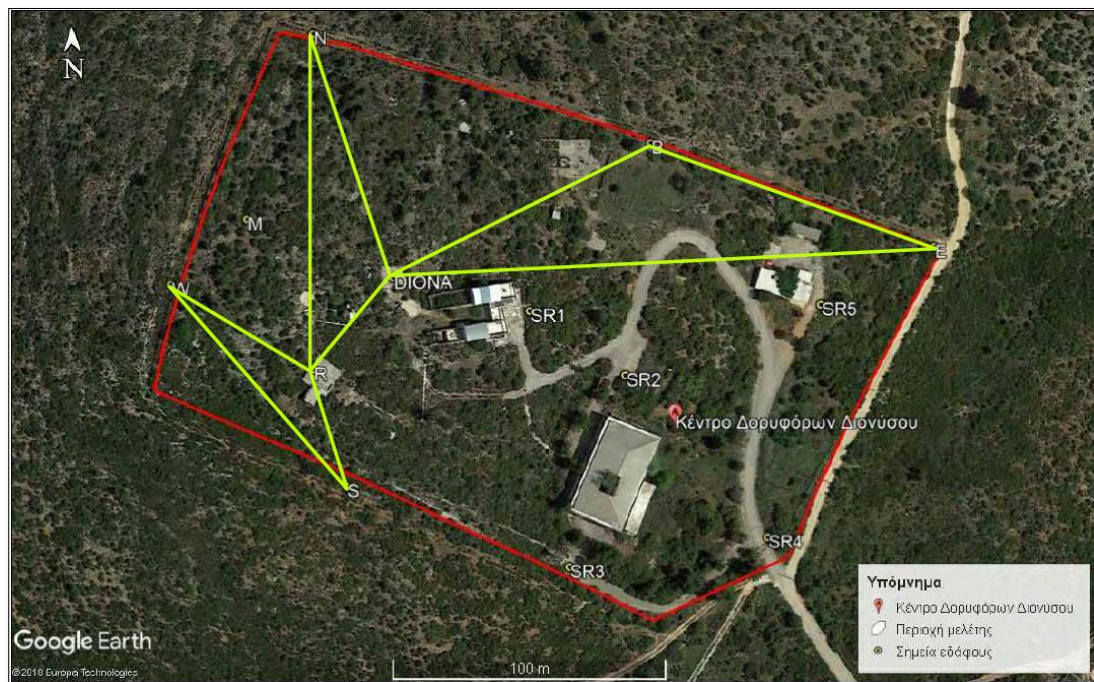


Εικόνα 23: Κεραία και δέκτης Javad

6.2.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS

Δεδομένης της ύπαρξης τριών δεκτών, σχεδιάστηκαν, αρχικά, σε έντυπο υπαίθρου πιθανοί συνδυασμοί μεταξύ των σημείων του εδάφους που να σχηματίζουν κλειστά γεωμετρικά σχήματα (τρίγωνα). Οι δέκτες μετακινούνταν κάθε φορά με τρόπο τέτοιο ώστε να γίνονται τουλάχιστον 2 με 3 μετρήσεις για κάθε σημείο και σε διαφορετικό τρίγωνο. Η γεωμετρία που ακολουθήθηκε για κάθε ημέρα μετρήσεων φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:

- 14/11/2018



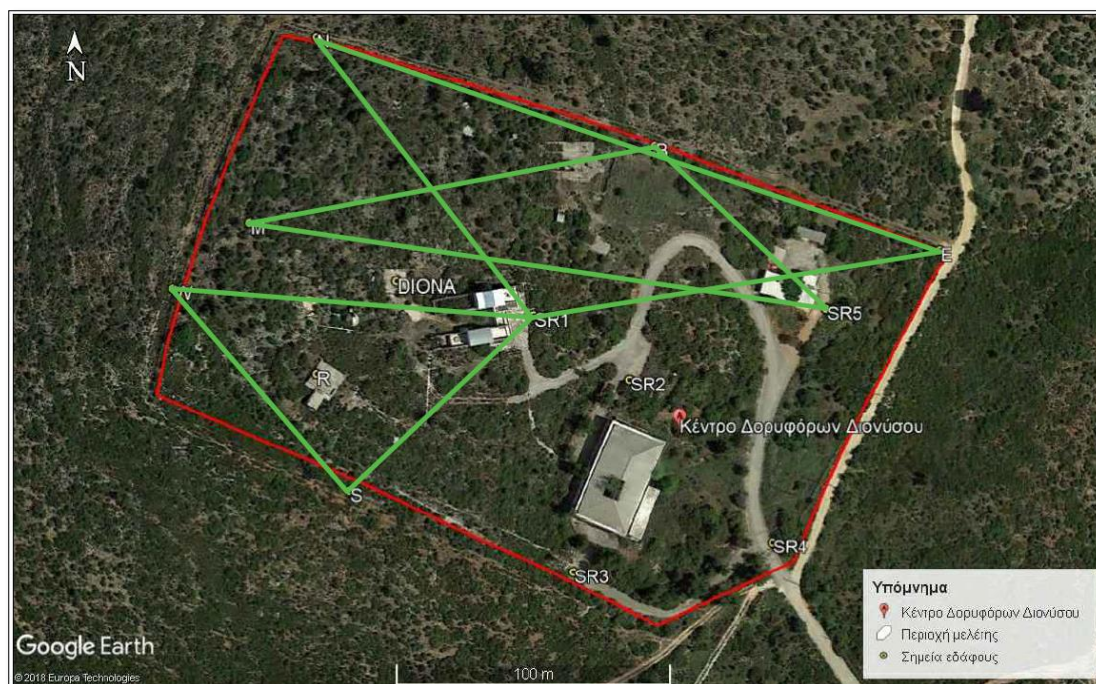
Εικόνα 24: Δίκτυο GPS

- 15/11/2018



Εικόνα 25: Δίκτυο GPS

- 16/11/2018



Εικόνα 26: Δίκτυο GPS

Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων που επιλέγονταν κάθε φορά για σχετικό εντοπισμό δεν ξεπερνούσαν τις μερικές δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες μέτρα, ενώ η διάρκεια των μετρήσεων κυμαινόταν περίπου από 40 λεπτά έως 1 ώρα σε κάθε σημείο. Για τον έλεγχο των σφαλμάτων και γενικώς για εξαγωγή ποιοτικών αποτελεσμάτων μετρήθηκαν περισσότερες βάσεις από τις ελάχιστες απαιτούμενες, ώστε να υπάρχει πλεονάζουσα πληροφορία για συνόρθωση του δικτύου.

Μέχρι να ολοκληρωθεί η μέτρηση όλου του δικτύου έγιναν εναλλαγές των δεκτών στα διάφορα σημεία, διατηρώντας έναν αριθμό κοινών σημείων μεταξύ των διαδοχικών μετρητικών περιόδων. Η συνόρθωση του δικτύου γίνεται στις τρεις διαστάσεις, στο τρισδιάστατο δηλαδή σύστημα αναφοράς και καταλήγει στον υψηλής ακρίβειας σχετικό προσδιορισμό του δικτύου, δηλαδή της γεωμετρικής του μορφής (σχήμα). Η απόλυτη ακρίβεια των συντεταγμένων ως προς το σύστημα αναφοράς είναι παρόμοια με την ακρίβεια του γνωστού σημείου.

6.2.3 ΒΑΡΥΤΗΤΑ

Στο στάδιο των μετρήσεων της βαρύτητας, πραγματοποιήθηκαν σχετικές μετρήσεις βαρύτητας, καθώς στην περιοχή μελέτης υπάρχει υλοποιημένο σημείο, του οποίου είναι γνωστή η απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Με γνωστή την τελευταία τιμή, προσδιορίζονται βάσει των σχετικών μετρήσεων, οι τιμές της βαρύτητας (ένταση) σε κάθε σταθμό μέτρησης.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το βαρυτόμετρο μοντέλου SCINTREX CG- 5 AUTOGRAV, το οποίο προκειμένου να λειτουργήσει και να ξεκινήσει τη διαδικασία μέτρησης, τοποθετήθηκε στη βάση του (χωρίς τρίποδα) πάνω σε κάθε υλοποιημένο στο έδαφος σημείο. Η διάρκεια μέτρησης σε κάθε σημείο ήταν 120".



*Εικόνα 27: Όργανο μέτρησης της βαρύτητας
(βαρυτόμετρο/βαρυτήμετρο)*

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στην αρχή της παραμόρφωσης των ελατηρίων, η οποία έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Το ελατήριο του οργάνου βρίσκεται σε κενό αέρος με σταθερή θερμοκρασία και υπολογίζει τις διαφορές της βαρύτητας μεταξύ δύο σταθμών (σχετική μέτρηση βαρύτητας).

Η ακρίβεια που δίνει το όργανο στις μετρήσεις με βάση το εγχειρίδιο του κατασκευαστή είναι:

Πίνακας 1: Τεχνικές προδιαγραφές βαρυτόμετρου SCINTREX CG- 5

Model	Resolution mGal	Range (without reset mGal)	Accuracy ^a mGal
SCINTREX CG- 5	0,001	7,000	0,005

(ΠΗΓΗ: A GUIDE TO HIGH PRECISION LAND GRAVIMETER SURVEYS, by H.O. Seigel)

Για τον προσδιορισμό της τιμής της βαρύτητας στις κορυφές του υλοποιημένου δικτύου, χρησιμοποιήθηκε η τιμή της απόλυτης βαρύτητας του σημείου DIONYSSOS AA, που εντοπίζεται στο υπόγειο του κεντρικού κτιρίου στο ΚΔΔ, η οποία έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια στο παρελθόν, με μέθοδο που αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

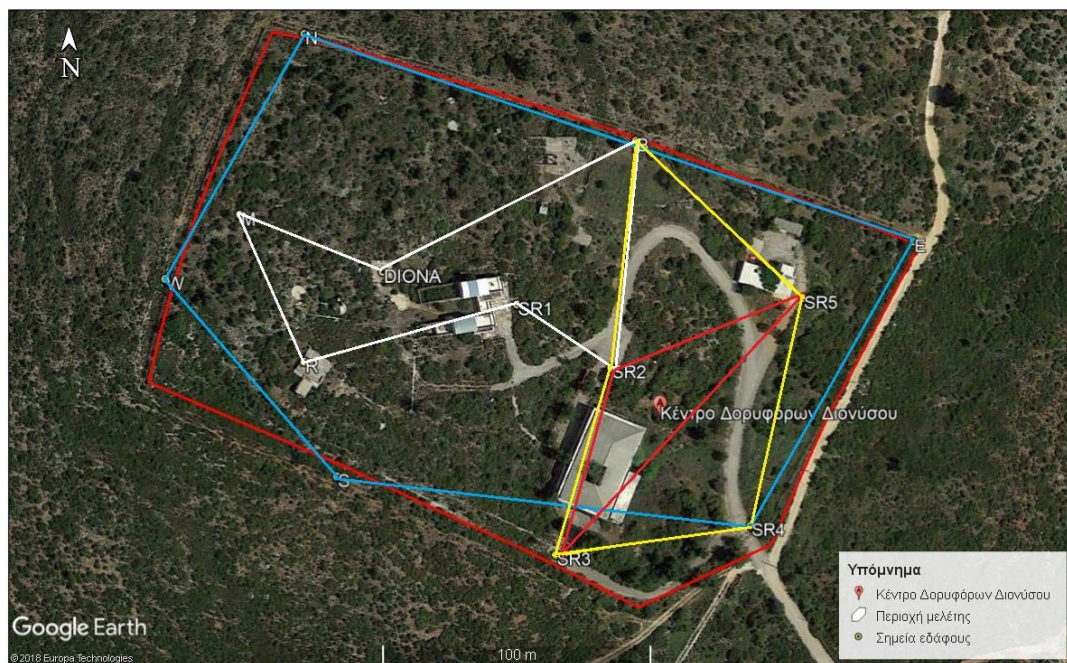
Οι μετρήσεις βαρύτητας που πραγματοποιήθηκαν έγιναν κατά τη διάρκεια δύο ημερών και επιλέχθηκε να γίνουν με τρόπο τέτοιο που να προκύπτουν κλειστοί βρόχοι, όπως φαίνεται παρακάτω:

- 14/11/2018



Εικόνα 28: Μέτρηση βαρύτητας σε κλειστούς βρόχους

- 15/11/2018



Εικόνα 29: Μέτρηση βαρύτητας σε κλειστούς βρόχους

Τη δεύτερη μέρα πραγματοποιήθηκε ένας βρόχος εντός του οποίου υπήρχαν και τέσσερις εσωτερικοί, όπως φαίνεται παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν προκειμένου να αναλυθούν τα δεδομένα που προέκυψαν από τις εργασίες υπαίθρου, τα οποία είναι απαραίτητα ώστε να προσδιορισθούν τα «σωστά» υψόμετρα και άρα να δημιουργηθεί ένα τοπικό μοντέλο που θα αναδεικνύει την κλίση, της υπό μελέτη περιοχής.

Για την πλήρη κατανόηση τόσο των δεδομένων όσο και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία τους, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη περιγραφή των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και του τρόπου που λειτουργούν, ώστε κατά την παρακολούθηση της διαδικασίας να γίνονται αντιληπτά τα βήματά της και ο χρήστης να είναι σε θέση να παρέμβει για να τα τροποποιήσει, σε περίπτωση που κριθεί αναγκαίο.

Η επεξεργασία/ανάλυση των δεδομένων πεδίου, αφορά στον κατά το δυνατό ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης των κορυφών του ιδρυμένου δικτύου, που προκύπτει από τη συνόρθωση των πρωτογενών δεδομένων. Η συνόρθωση είναι μία διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται οι καλύτερες τιμές των πρωτογενών μετρήσεων, μαζί με τα σφάλματα που φέρουν. Εφόσον ολοκληρωθεί το στάδιο αυτό, γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

7.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

Για να γίνει η επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά το στάδιο των εργασιών πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικά λογισμικά προγράμματα. Πιο αναλυτικά, για την επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GNSS Solutions, το οποίο έχει σχεδιαστεί για επιστημονικούς σκοπούς. Για τις μετρήσεις βαρύτητας έγινε χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MatLab, ενώ για την επίλυση της χωροστάθμησης, καθώς και για άλλες απλές υπολογιστικές πράξεις χρησιμοποιήθηκε ένα από τα εργαλεία της Microsoft (Excel). Τέλος για την οπτικοποίηση του αποτελέσματος χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του λογισμικού Surfer.

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού και της κατάλληλης τεχνικής για την επεξεργασία των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται κυρίως από την επιδιωκόμενη ακρίβεια και δευτερευόντως από τον διαθέσιμο εξοπλισμό και την τεχνική απόκτησης των δεδομένων.

- **GNSS Solutions**

Παρά το γεγονός ότι κάθε τύπος δορυφορικού δέκτη δίνει τα δεδομένα που μετρήθηκαν σε διαφορετικού τύπου αρχείου, η ευκολία μετατροπής τους σε ένα κοινό

αποδεχόμενο τύπου αρχείο με την ονομασία RINEX (Receiver INdependent data EXchange), κάνει δυνατή την επεξεργασία οποιουδήποτε είδους δεδομένων από κάθε λογισμικό που αναγνωρίζει αυτόν τον τύπο αρχείου.

Περιγραφή αρχείου RINEX εκπεμπόμενης εφημερίδας

Το αρχείο που ακολουθεί είναι το αρχείο του μηνύματος πλοήγησης (navigation file) σε RINEX format:

2.10	NAVIGATION DATA	GPS(GPS)	RINEX VERSION / TYPE
cnvtToRINEX 2.60.0	convertToRINEX OPR	19-Nov-18 11:43 UTC	PGM / RUN BY / DATE
-----			COMMENT
0.1211D-07	-0.7451D-08	-0.1192D-06	0.5960D-07
0.9830D+05	-0.8192D+05	-0.1966D+06	0.4588D+06
-0.372529029846D-08	-0.799360577730D-14	503808	0 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
18			LEAP SECONDS
			END OF HEADER
1 18 11 14 10 00	0.0-0.114148482680D-03	0.534328137292D-11	0.000000000000D+00
	0.590000000000D+02	-0.693437500000D+02	0.438625402666D-08
	0.155727356557D+01	-0.356510281563D-05	0.815283344127D-02
	0.629574060440D-05	0.515366436005D+04	0.295200000000D+06
	-0.122934579849D-06	0.527607646096D+00	0.987201929092D-07
	0.973391004157D+00	0.266375000000D+03	0.699562982623D+00
	-0.805855027153D-08	-0.460733465268D-10	0.100000000000D+01
	0.202700000000D+04	0.000000000000D+00	0.240000000000D+01
	0.000000000000D+00	0.558793544769D-08	0.590000000000D+02
	0.292218000000D+06	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00
	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
11 18 11 14 10 00	0.0-0.699978321791D-03	0.409272615798D-11	0.000000000000D+00
	0.480000000000D+02	-0.480000000000D+02	0.606346706178D-08
	0.899480532392D+00	-0.276789069176D-05	0.168014974333D-01
	0.423938035965D-05	0.515366616631D+04	0.295200000000D+06
	-0.143423676491D-06	0.895873886343D-01	-0.284984707832D-06
	0.907628319003D+00	0.271812500000D+03	0.184032400408D+01
	-0.908002117939D-08	0.475019780455D-10	0.100000000000D+01
	0.202700000000D+04	0.000000000000D+00	0.240000000000D+01
	0.000000000000D+00	-0.121071934700D-07	0.480000000000D+02
	0.292218000000D+06	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00
	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
18 18 11 14 10 00	0.0 0.791698694229D-04	0.409272615798D-11	0.000000000000D+00
	0.720000000000D+02	-0.742187500000D+02	0.485448792276D-08
	0.134237009220D+01	-0.407919287682D-05	0.149624641053D-01
	0.595860183239D-05	0.515362123871D+04	0.295200000000D+06
	-0.247731804848D-06	0.476718611438D+00	-0.229105353355D-06
	0.951869899259D+00	0.263281250000D+03	0.136323166828D+01
	-0.837463431935D-08	-0.135719942229D-10	0.100000000000D+01
	0.202700000000D+04	0.000000000000D+00	0.240000000000D+01
	0.000000000000D+00	-0.651925802231D-08	0.720000000000D+02
	0.292218000000D+06	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00
	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00

Εικόνα 30: Μορφή αρχείου RINEX

Οι τρεις πρώτες γραμμές: επικεφαλίδα (τύπος αρχείου, έκδοση rinex, πρόγραμμα μετατροπής πρωτογενών δεδομένων σε rinex, εταιρία- χρήστης, ημερομηνία, end of header). Μερικά προγράμματα καταγράφουν σε επιπλέον γραμμές τους οκτώ συντελεστές του εκπεμπόμενου ιονοσφαιρικού μοντέλου καθώς και άλλα στοιχεία, όπως παράμετροι για τον υπολογισμό του χρόνου UTC, ο αριθμός των δίσεκτων δευτερολέπτων, κλπ.

Όσον αφορά στις γραμμές, ανά οκτώ (8) αφορούν διαφορετικό δορυφόρο και περιλαμβάνουν στοιχεία που σχετίζονται με την εποχή, την παλαιότητά του, τον αριθμό εβδομάδας GPS, το δείκτη ακριβείας του δορυφόρου, τον κωδικό υγείας του, καθώς και το χρόνο εκπομπής του μηνύματος (GPS seconds τρέχουσας εβδομάδας).

- **MatLab**

Το παρόν προγραμματιστικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει για γρήγορη επεξεργασία πολύπλοκων δεδομένων, με άμεση εξαγωγή αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του κώδικα που αφορά τη συνόρθωση του δικτύου GPS που δημιουργήθηκε, καθώς και τη διόρθωση των ορθομετρικών υψομέτρων, από την επίδραση της βαρύτητας. Όμοια χρησιμοποιήθηκε και το Excel, για πιο απλούς υπολογισμούς.

- **Surfer**

Το περιβάλλον του λογισμικού Surfer, χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να οπτικοποιηθεί το ζητούμενο μοντέλο γεωειδούς. Εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα, τα οποία είναι οι συντεταγμένες των σημείων του εδάφους συνοδευόμενα από το υψόμετρο N του γεωειδούς που τους αντιστοιχεί, προκύπτει το μοντέλο κλίσεων για το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου (περιοχή μελέτης). Προκειμένου να αποδοθεί μια βέλτιστη εικόνα του μοντέλου της υπό μελέτη περιοχής επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ισοδιάσταση των 0,005 χιλιοστών, δεδομένης και της ακρίβειας των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

7.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

Τα πρωτογενή δεδομένα που προκύπτουν από την εφαρμογή της γεωμετρικής χωροστάθμησης είναι (ορθομετρικές) υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων του εδάφους και των υψομετρικών αφετηριών. Με γνωστές τις τιμές υψομέτρων των υψομετρικών αφετηριών (Refer), προσδιορίζονται τα ορθομετρικά υψόμετρα των υλοποιημένων, στο έδαφος, σημείων. Τα υψόμετρα αυτά, επιδιώκεται να διορθωθούν βαρυτομετρικά, προκειμένου να προσδιοριστεί αν επηρεάζει ή όχι η επίδραση της βαρύτητας τις μετρήσεις αυτές, δεδομένης της έκτασης που μελετάται.

Σε κάθε σημείο του εδάφους πραγματοποιήθηκαν περισσότερες της μίας μέτρησης με αποτελέσματα να υπάρχει πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία να επιτρέπει την ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση. Η MET εφαρμόζεται στο σημείο αυτό προκειμένου οι μετρήσεις βαρυτομετρίας να διορθωθούν από το λεγόμενο drift (drift correction).

Οι μετρήσεις σχετικής βαρύτητας που λήφθηκαν από το βαρυτόμετρο δεν είναι απαλλαγμένες από σφάλματα. Μια από τις κυριότερες πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν χρονικά τις μετρήσεις οφείλεται στη λεγόμενη “πορεία” ή “ολίσθηση” (instrument drift) του οργάνου, η οποία προκαλεί μια αργή αλλά συνεχή μεταβολή των ενδείξεων του οργάνου εξαιτίας της αλλοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του ελατηρίου του. Το μέγεθος και η μορφή της αποτελούν κριτήρια της ακρίβειας του οργάνου. Η ολίσθηση μπορεί να εμφανίζεται τόσο σε σταθερά βαρυτόμετρα (στατική

ολίσθηση), όσο και σε συνθήκες εργασιών πεδίου (δυναμική ολίσθηση). Το μέγεθος της στατικής ολίσθησης είναι τυπικά της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-8} m/sec² ανά ημέρα, ενώ κάτω υπό συνθήκες εργασιών πεδίου αγγίζει τα επίπεδα 10^{-5} έως 10^{-7} m/sec² ανά ημέρα. Στην πράξη ο έλεγχος και η επίδραση της ολίσθησης στις μετρήσεις βαρύτητας επιτυγχάνεται με επαναληπτικές μετρήσεις σε μικρό αριθμό σημείων στο πεδίο ακολουθώντας τυποποιημένα σχήματα μετρήσεων (π.χ. κλειστές ή εξαρτημένες οδεύσεις). Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, προκειμένου να προσδιοριστεί η τιμή του drift, θεωρώντας ότι η πορεία μεταβλήθηκε γραμμικά μεταξύ των (διαδοχικών) μετρήσεων, ώστε να είναι δυνατό να υπολογιστεί για κάθε μέτρηση η πορεία (drift) που αντιστοιχεί στο χρόνο που πραγματοποιήθηκε.

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, λήφθηκαν τα στοιχεία μέτρησης από το βαρυτόμετρο, τα οποία αναγράφονται σε ένα αρχείο της παρακάτω μορφής:

```
-----LAT-----LONG-----ALT---GRAVITY---SD--TILTX--TILTY--TEMP--TIDE DUR REJ----TIME--DEC.TIME+DATE--TERRAIN-----DATE
38.0780525 23.9331741 476.7000 7235.082 0.057 -3.5 -1.2 182.17 -0.044 120 0 09:05:19 43386.37809 0.0000 2018/11/14
38.0782394 23.9334183 473.8000 7234.209 0.063 -3.1 0.7 182.10 -0.046 120 0 09:12:02 43386.38274 0.0000 2018/11/14
38.0778046 23.9339962 447.9000 7236.272 0.042 -3.3 -1.3 182.10 -0.047 120 0 09:20:31 43386.38862 0.0000 2018/11/14
38.0787315 23.9347210 447.1000 7237.169 0.068 -4.0 -10.5 182.10 -0.049 120 0 09:28:09 43386.39392 0.0000 2018/11/14
38.0792999 23.9323006 449.3000 7234.986 0.039 2.8 -8.0 182.09 -0.051 120 0 09:42:33 43386.40390 0.0000 2018/11/14
38.0783043 23.9315224 461.6000 7233.042 0.042 -9.6 0.8 182.10 -0.053 120 0 09:53:15 43386.41132 0.0000 2018/11/14
38.0778427 23.9325600 458.2000 7234.417 0.063 -4.8 1.7 182.13 -0.054 120 1 10:01:57 43386.41735 0.0000 2018/11/14
38.0778427 23.9325600 458.2000 7235.091 0.047 -4.8 1.7 182.14 -0.055 120 0 10:14:40 43386.42617 0.0000 2018/11/14
38.0782623 23.9334106 460.6000 7234.192 0.051 -9.0 -2.9 182.11 -0.056 120 0 10:21:55 43386.43120 0.0000 2018/11/14
38.0782814 23.9320889 457.3000 7232.230 0.062 -13.4 -4.2 182.09 -0.057 120 0 10:28:44 43386.43592 0.0000 2018/11/14
38.0787239 23.9319210 468.9000 7232.427 0.061 3.9 0.0 182.11 -0.057 120 0 10:36:48 43386.44151 0.0000 2018/11/14
38.0786209 23.9324780 466.2000 7232.026 0.063 -3.3 4.1 182.12 -0.058 120 0 10:44:45 43386.44703 0.0000 2018/11/14
38.0784950 23.9330044 459.1000 7232.815 0.040 -2.0 -2.8 182.12 -0.058 120 0 10:50:43 43386.45116 0.0000 2018/11/14
38.0782814 23.9333706 458.3000 7234.204 0.056 -9.1 -1.5 182.13 -0.058 120 0 10:56:32 43386.45520 0.0000 2018/11/14
38.0789600 23.9335499 461.1000 7233.895 0.060 -3.1 1.8 182.12 -0.058 120 0 11:03:36 43386.46010 0.0000 2018/11/14
38.0784874 23.9342041 448.8000 7235.684 0.070 -2.2 -6.3 182.13 -0.058 120 0 11:13:33 43386.46699 0.0000 2018/11/14
-----LAT-----LONG-----ALT---GRAVITY---SD--TILTX--TILTY--TEMP--TIDE DUR REJ----TIME--DEC.TIME+DATE--TERRAIN-----DATE
38.0780983 23.9331226 461.0000 7235.182 0.038 -1.7 1.6 182.15 -0.012 120 0 08:12:50 43387.34170 0.0000 2018/11/15
38.0776291 23.9333134 0.0000 7234.312 0.047 -11.4 -0.3 182.13 -0.014 120 0 08:18:36 43387.34570 0.0000 2018/11/15
38.0790176 23.9334507 464.7000 7234.029 0.045 -13.1 5.1 182.11 -0.016 120 3 08:25:11 43387.35026 0.0000 2018/11/15
38.0784798 23.9341431 456.7000 7235.864 0.029 -4.1 3.1 182.09 -0.019 120 0 08:31:55 43387.35493 0.0000 2018/11/15
38.0777359 23.9339962 453.4000 7236.406 0.029 -0.7 -2.3 182.09 -0.021 120 0 08:38:14 43387.35931 0.0000 2018/11/15
38.0777321 23.9331455 465.1000 7235.361 0.022 -2.6 -2.8 182.09 -0.023 120 0 08:43:57 43387.36327 0.0000 2018/11/15
38.0783043 23.9333324 475.2000 7234.345 0.038 -5.8 -8.0 182.10 -0.026 120 0 08:53:03 43387.36958 0.0000 2018/11/15
38.0777321 23.9340096 453.2000 7236.412 0.022 -4.3 3.5 182.12 -0.029 120 0 09:00:14 43387.37456 0.0000 2018/11/15
38.0778122 23.9325199 467.4000 7234.565 0.066 9.7 1.0 182.12 -0.032 120 0 09:10:58 43387.38200 0.0000 2018/11/15
38.0783348 23.9315262 464.4000 7233.186 0.021 -7.0 -1.8 182.12 -0.035 120 0 09:20:40 43387.38873 0.0000 2018/11/15
38.0792656 23.9322681 450.6000 7235.138 0.043 -0.3 -3.0 182.11 -0.038 120 1 09:28:50 43387.39439 0.0000 2018/11/15
38.0787315 23.9347496 444.4000 7237.319 0.028 -3.0 -3.1 182.11 -0.041 120 0 09:39:32 43387.40181 0.0000 2018/11/15
38.0776939 23.9339771 444.8000 7236.444 0.025 0.6 -3.3 182.11 -0.043 120 0 09:47:48 43387.40754 0.0000 2018/11/15
38.0790482 23.9335213 463.3000 7234.098 0.038 2.2 -0.6 182.12 -0.045 120 0 09:54:54 43387.41246 0.0000 2018/11/15
38.0782623 23.9333820 460.1000 7234.387 0.035 2.0 -3.0 182.11 -0.047 120 0 10:01:58 43387.41736 0.0000 2018/11/15
38.0784645 23.9330006 453.3000 7232.997 0.033 -4.7 -4.0 182.11 -0.049 120 0 10:08:47 43387.42209 0.0000 2018/11/15
38.0782585 23.9321575 464.6000 7232.418 0.031 -12.4 4.4 182.10 -0.050 120 0 10:14:37 43387.42613 0.0000 2018/11/15
38.0786896 23.9319420 463.9000 7232.616 0.033 -3.6 -2.9 182.09 -0.052 120 1 10:21:51 43387.43115 0.0000 2018/11/15
38.0786133 23.9324417 472.3000 7232.238 0.032 -4.3 0.0 182.08 -0.053 120 1 10:28:25 43387.43570 0.0000 2018/11/15
38.0790062 23.9334965 458.4000 7234.122 0.044 0.0 -3.5 182.10 -0.055 120 0 10:36:23 43387.44123 0.0000 2018/11/15
38.0781822 23.9334545 465.8000 7234.399 0.026 -9.8 8.7 182.09 -0.056 120 0 10:42:21 43387.44536 0.0000 2018/11/15
38.0777092 23.9331455 454.6000 7235.427 0.025 -2.3 1.5 182.09 -0.057 120 0 10:49:09 43387.45008 0.0000 2018/11/15
38.0784836 23.9341431 457.9000 7235.923 0.035 -5.0 -4.7 182.12 -0.058 120 5 10:56:17 43387.45502 0.0000 2018/11/15
38.0782852 23.9333096 451.9000 7234.414 0.027 -2.3 -5.2 182.14 -0.059 120 23 11:03:08 43387.45977 0.0000 2018/11/15
38.0782852 23.9333096 451.9000 7235.283 0.035 -3.4 -0.4 182.13 -0.059 120 0 11:08:09 43387.46325 0.0000 2018/11/15
```

Εικόνα 31: Αποθηκευμένο αρχείο του βαρυτόμετρου (αρχείο μετρήσεων)

Οι στήλες με σειρά από τα αριστερά προς τα δεξιά αναφέρονται:

- Στις συντεταγμένες των σημείων (LAT, LONG, ALT).
- Στην τιμή της βαρύτητας (GRAVITY).
- Στην τυπική απόκλιση των μετρήσεων (SD).
- Στην κλίση του οργάνου (όταν δεν έχει πραγματοποιηθεί απόλυτα η οριζοντίωσή του) (TILTX, TILTY).

- Στη θερμοκρασία του οργάνου μετρημένη σε βαθμούς Κ° (TEMP).
- Στις γήινες παλίρροιες που υπολογίζονται από το εσωτερικό μοντέλο που περιέχεται στο όργανο (TIDE).
- Στη διάρκεια των μετρήσεων (120'') (DUR).
- Στις μετρήσεις που απορρίφθηκαν (π.χ. 5/120) (REJ).
- Στο χρόνο έναρξης των μετρήσεων και την ημερομηνία διεξαγωγής των μετρήσεων.
- Στην τοπογραφική διόρθωση, η οποία στην περίπτωση μας είναι ίση με το μηδέν (0), καθώς δεν έχει περαστεί κάποιο μοντέλο τοπογραφίας για την περιοχή.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι μετρήσεις βαρύτητας έγιναν σε διάρκεια δύο ημερών με τη μέθοδο των κλειστών βρόχων. Κάθε βρόχος επεξεργάζεται ανεξάρτητα από τους άλλους και θεωρείται ότι πρόκειται για μετρήσεις που ακολουθούν γραμμικές συναρτήσεις. Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία επεξεργασίας των βρόχων βαρύτητας αποτελείται από τα παρακάτω βήματα [<http://bluewhaleprocessing.com/>]:

1. *Μετατροπή μετρήσεων βαρύτητας οργάνου σε μονάδες βαρύτητας*, στην περίπτωση που το όργανο από τον κατασκευαστή του δεν παρουσιάζει τις μετρήσεις στη σωστή μονάδα (mGal).
2. *Παλιρροιακή διόρθωση (tidal correction)*: στην περίπτωση που το όργανο εφαρμόζει παλιρροιακές διορθώσεις στις μετρήσεις, αυτές πρέπει να αφαιρούνται από τις μετρήσεις βαρύτητας.

$$g = g_i - t_i,$$

όπου g_i : μέτρηση βαρύτητας κάθε σημείου του βρόχου

t_i : αντιπροσωπεύει την τιμή της διορθωτικής παλιρροιακής διόρθωσης με όργανα

3. *Αναγωγή ύψους οργάνου*, σε περίπτωση που το όργανο τοποθετηθεί σε τρίποδα.
4. *Διόρθωση και μείωση της υπολειμματικής ολίσθησης (πορείας) του οργάνου (Instrument residual drift correction and reduction to the base)*:

Η πολυωνυμική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του drift για κάθε μέτρηση σε δεδομένο βρόχο βαρύτητας είναι:

$$d_r = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i (t - t_0)^i \quad (7.2.1)$$

όπου A_0, A_i : Συντελεστές του πολυωνύμου που υπολογίζονται μέσω της συνόρθωσης κάθε βρόχου

t : Χρόνος παρατήρησης κάθε σημείου του βρόχου

t_0 : Χρόνος της πρώτης παρατήρησης στον βρόχο

Από τα παραπάνω βήματα, δεδομένου του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε (SCINTREX CG- 5), παραλήφθηκαν τα βήματα 1 έως 3, καθώς οι μετρήσεις του οργάνου βρίσκονται στις σωστές μονάδες μέτρησης, η παλιρροιακή διόρθωση δεν συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις και τέλος δεν χρησιμοποιήθηκε τρίποδας, με αποτέλεσμα το ύψος του οργάνου να παραμένει σταθερό.

Εφόσον δημιουργηθούν οι εξισώσεις παρατήρησης για κάθε βρόχο εφαρμόζεται η ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση, μέσω της εφαρμογής των πράξεων μεταξύ των πινάκων που δημιουργούνται ($Ax = \delta l + u$). Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι τελικές τιμές της βαρύτητας κάθε σημείου, διορθωμένες από την «πορεία» του οργάνου (drift).

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις βαρύτητας ολοκληρώθηκαν εντός δύο ημερών και τα σημεία στην πλειοψηφία τους μετρήθηκαν άνω της μίας φορές, το σύστημα «όργανο – παρατηρητής – συνθήκες» είναι μεταβλητό, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην μπορούν να θεωρηθούν ίσης ακρίβειας και συνεπώς να μην αποτελούν δείγμα από τον ίδιο πληθυσμό. Στην περίπτωση αυτή οι μετρήσεις θεωρούνται ανισοβαρείς.

Για την εφαρμογή της MET στις ανισοβαρείς παρατηρήσεις, χρειάζεται να εισαχθεί η έννοια του βάρους, μίας τιμής που εκφράζει το πόσο περισσότερο θα πρέπει να συμβάλλει μία μέτρηση στο τελικό αποτέλεσμα σε σχέση με κάποια άλλη. Στην περίπτωση των παρόντων μετρήσεων, ως βάρος θεωρήθηκε κάθε φορά το σφάλμα με την μικρότερη, αριθμητικά, τιμή. Βάσει των μετρήσεων που έγιναν προέκυψαν βρόχοι όπου οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι (m) ταυτίζονται, σε αριθμό, με τις παρατηρήσεις (n), με αποτέλεσμα το σύστημα να έχει μοναδική λύση και ως σφάλμα της κάθε μέτρησης να είναι η τιμή του drift, όπως αυτή υπολογίζεται από τη συνόρθωση (παράμετρος $(t - t_0)^i$ σχ. 7.2.1). Οι τελικές συνδιορθωμένες τιμές της βαρύτητας για τις κορυφές του δικτύου μελέτης είναι:

Πίνακας 2: Συνδιορθωμένες τιμές βαρύτητας

ΣΗΜΕΙΟ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (mgal)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ (mgal/sec)
SR1	979958,986	4,57E-06
SR2	979960,377	1,95E-06
SR3	979961,401	9,08E-06
SR4	979962,441	2,03E-06
SR5	979961,902	9,08E-06
E	979963,335	1,98E-06
N	979961,152	1,98E-06
W	979959,207	1,98E-06
S	979960,582	1,98E-06

R	979958,407	4,57E-06
M	979958,601	4,57E-06
B	979960,088	1,60E-05
DIONA	979958,206	4,57E-06

Σημειώνεται ότι η 3η στήλη αφορά την ποιότητα της συνόρθωσης.

Παρατηρώντας το δείκτη ποιότητας της τιμής της βαρύτητας για το σημείο B, σημειώνεται ότι έχει τη μεγαλύτερη, αριθμητικά, τιμή από τους υπόλοιπους δείκτες, καθώς μετρήθηκε μόνο μία φορά και δεν επιλύθηκε με τη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων όπως οι υπόλοιπες παρατηρήσεις.

Οι τελικές, συνορθωμένες, τιμές της βαρύτητας χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση, από την επίδραση της βαρύτητας, των ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών που υπολογίστηκαν από τη γεωμετρική χωροστάθμηση.

Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι κατά τη διαδικασία της συνόρθωσης, εισάγεται στα δεδομένα των παρατηρήσεων η τιμή της απόλυτης βαρύτητας του σημείου DIONYSSOS AA, η οποία έχει υπολογιστεί με καλή ακρίβεια στο παρελθόν. Η διαδικασία προσδιορισμού της τιμής αυτής, στο σημείο DIONYSSOS AA του ΚΚΔ προσδιορίστηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας τη Ιταλίας (Istituto di Metrologia "G. Colonnetti": IMGC), από το Σεπτέμβριο του 1996 έως τον Ιούνιο του 1998.

Το πρόγραμμα αυτό διεξήχθη στα πλαίσια της σύμβασης αρθ. 3 της 1996/07/22, μεταξύ του Πανεπιστημίου της Μπολόνια (Dipartimento di Fisica) και του Ινστιτούτο μετρολογίας (Istituto di Metrologia "G. Colonnetti": IMGC) και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα στα πλαίσια της σύμβασης για το S.E.L.F. II: Sea Level Fluctuation: geophysical interpretation and environmental impact (Διακύμανση της στάθμης της θάλασσας: γεωφυσική ερμηνεία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις). Οι απόλυτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τους: G. Cerutti, P. De Maria, S. Desogus, A. Germak και F. Mazzoleni, με τη βοήθεια ενός βαρυμετρική σχεδιασμένο και κατασκευασμένο στο IMGC σε συνεργασία με το Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Το όργανο αυτό είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τον προσδιορισμό του "g" σε διάφορα μέρη της Ευρώπης, των ΗΠΑ, της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας και της Ανταρκτικής.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό των απόλυτων τιμών του "g" είναι αυτή της ελεύθερης πτώσης ενός σώματος που υπόκειται αποκλειστικά στη δύναμη της βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση αυτού του σώματος παρατηρείται κατά μήκος μιας τροχιάς συμμετρικής στην κορυφή της τροχιάς.

Κατά τη μέθοδο αυτή ένα σώμα ρίχνεται προς τα πάνω κατακόρυφα και στην πορεία του αυτή, περνά μέσα από ένα μεγάλο αριθμό αμοιβαία ισότιμων σημείων ή σταθμών. Η μέθοδος μέτρησης, που ονομάζεται μέθοδος πολλαπλών σταθμών, συνίσταται στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται το σώμα για να ταξιδέψει στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών. Τα δεδομένα κάθε εκτόξευσης αποθηκεύονται και στη συνέχεια αναλύονται από έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος υπολογίζει την τιμή "g" που ταιριάζει καλύτερα στο νόμο της κίνησης.

DIONYSOS (GREECE)	
The measurement point is located in a room of the Dionysos Satellite Observatory (Fig. 4.11)	
Date:	27 th ÷ 28 th September 1996
Number of measurements:	n = 107
Measured mean value of g:	g = 979 961 251,5 μgal
Standard deviation:	s (g) = 12,9 μgal
Type A standard uncertainty:	u _A (g) = 5,1 μgal
Level of the measurement point to floor surface:	H ₀ = 0,9284 m
Elevation of the station above sea level	H = 481 m
Normal air pressure	P _n = 957 mbar
Actual observed air pressure	P _a = 959 ± 0,2 mbar
δg = 0,3 · δP	δg (P) = 0,6 μgal
Correction for polar motion:	δg (pol. mot.) = -2,8 μgal
g corrected:	\bar{g}_c = 979 961 249,3 μgal
Combined standard uncertainty:	u _c = 7,3 μgal

Εικόνα 32: Αποτελέσματα μετρήσεων βαρύτητας στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου

7.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

Στο στάδιο αυτό η επεξεργασία αφορά τον υπολογισμό των ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών ανάμεσα στα υλοποιημένα, στο έδαφος, σημεία. Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων της γεωμετρικής χωροστάθμησης, υπολογίστηκαν οι υψομετρικές διαφορές ΔH μεταξύ των σημείων του εδάφους και των υλοποιημένων, στην περιοχή, υψομετρικών αφετηριών (reper). Προκειμένου να διαμορφωθούν οι υψομετρικές αυτές διαφορές έτσι ώστε να συνδέουν τα σημεία του εδάφους μεταξύ τους, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα (μετρήσεις) που συνδέουν τις υψομετρικές αφετηρίες με τα αντίστοιχα σημεία εδάφους.

Οι υπολογισμένες αυτές υψομετρικές διαφορές στη συνέχεια διορθώθηκαν από την επίδραση της βαρύτητας.

Πίνακας 3: Βαρυτομετρικά διορθωμένες υψομετρικές διαφορές σημείων εδάφους

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΕΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (m)	ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΕΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ (m)	ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ (m)
<i>ΔH SR4 - E</i>	-4,0515	-4,0523	-2,53E-04
<i>ΔH E - B</i>	14,1420	14,1430	9,52E-04
<i>ΔH B - N</i>	-4,6800	-4,6803	-3,13E-04
<i>ΔH N - M</i>	11,3450	11,3458	7,52E-04
<i>ΔH M - W</i>	-2,9065	-2,9067	-1,72E-04
<i>ΔH W - S</i>	-5,2580	-5,2584	-4,40E-04
<i>ΔH S - SR3</i>	-3,2860	-3,2863	2,53E-04
<i>ΔH SR3 - SR4</i>	-5,3050	-5,3053	-2,74E-04
<i>ΔH SR2 - B</i>	0,4685	0,4686	1,18E-04
<i>ΔH SR1 - R</i>	1,8135	1,8142	2,04E-04
<i>ΔH R - DIONA</i>	1,4150	1,4150	3,89E-05
<i>ΔH R - M</i>	-0,5505	-0,5506	-7,06E-05
<i>ΔH B - SR5</i>	-7,6835	-7,6840	-5,44E-04
<i>ΔH DIONA - SR1</i>	-3,2285	-3,2292	-2,43E-04
<i>ΔH SR1 - SR2</i>	-5,8680	-5,8684	-4,24E-04
<i>ΔH SR2 - SR5</i>	-7,2150	-7,2154	-4,27E-04
<i>ΔH SR5 - SR4</i>	-2,4065	-2,4072	-1,55E-04
<i>ΔH SR4 - SR3</i>	5,3055	5,3063	2,74E-04
<i>ΔH M - DIONA</i>	1,9630	1,9631	1,10E-04

Βάσει του πίνακα που προηγήθηκε και προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των υψομετρικών διαφορών και έπειτα των ζητούμενων ορθομετρικών υψομέτρων, εφαρμόστηκε ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση του δικτύου. Τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτής αναγράφονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Συνορθωμένες υψομετρικές διαφορές σημείων εδάφους

ΣΗΜΕΙΟ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΣΥΝΟΡΘΩΜΕΝΕΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ως προς το DIONA (m)	ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ $\sigma_{\hat{x}}$ (m)
SR1	-3,2291	1,35E-03
SR2	-9,0977	1,84E-03
SR3	-13,4147	2,29E-03
SR4	-18,7204	2,18E-03
SR5	-16,3132	2,05E-03
E	-22,7724	2,29E-03

S	-10,1286	2,30E-03
W	-4,8704	2,04E-03
N	-13,3096	1,90E-03
R	-1,4144	1,27E-03
M	-1,9639	1,35E-03
B	-8,6293	1,93E-03
DIONA	-3,2291	1,35E-03

Το τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης είναι ίσο με:

$$\sigma_0 = 6,7898E-04 \text{ m}$$

Στο σημείο αυτό, προκειμένου να ελεγχθεί ποιοτικά η επίλυση του δικτύου και συνεπώς η επιλογή των τιμών αυτών (ΔH) ως βέλτιστων, μελετήθηκαν τα υπόλοιπα της συνόρθωσης, ως προς την τάξη μεγέθους τους.

Πίνακας 5: Πίνακας υπολοίπων (1^η συνόρθωση)

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ (u)
$\Delta H \text{ SR4} - E$	2,038E-04
$\Delta H E - B$	2,038E-04
$\Delta H B - N$	-4,750E-05
$\Delta H N - M$	-4,750E-05
$\Delta H M - W$	1,968E-04
$\Delta H W - S$	1,968E-04
$\Delta H S - \text{SR3}$	1,968E-04
$\Delta H \text{ SR3} - \text{SR4}$	-4,016E-04
$\Delta H \text{ SR2} - B$	-1,654E-04
$\Delta H \text{ SR2} - R$	4,347E-04
$\Delta H R - \text{DIONA}$	-6,249E-04
$\Delta H R - M$	1,060E-03
$\Delta H B - \text{SR5}$	8,584E-05
$\Delta H \text{ DIONA} - \text{SR1}$	1,904E-04
$\Delta H \text{ SR1} - \text{SR2}$	-2,443E-04
$\Delta H \text{ SR2} - \text{SR5}$	-7,890E-05
$\Delta H \text{ SR5} - \text{SR4}$	6,947E-06
$\Delta H \text{ SR4} - \text{SR3}$	-5,984E-04
$\Delta H M - \text{DIONA}$	8,153E-04

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των υπολοίπων, διαπιστώνεται ότι για την έκταση του δικτύου που μελετάται τα σφάλματα που προκύπτουν είναι σημαντικά. Για το σκοπό αυτό επιδιώχθηκε να γίνει μια περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων, ώστε να εντοπιστεί το τυχόν «προβληματικό» σημείο της επίλυσης. Στον Πίνακα 5, λοιπόν,

παρατηρείται ότι το υπόλοιπο που αντιστοιχεί στην παρατήρηση της υψομετρικής διαφοράς ΔΗ R – M, παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες τιμές. Βασιζόμενοι στη διαφορά αυτή, επιδιώχθηκε να ξανά γίνει συνόρθωση του δικτύου, χωρίς να ληφθεί υπόψη αυτή τη φορά η παρατήρηση ΔΗ R- M.

Τα αποτελέσματα της νέας συνόρθωσης είναι:

Πίνακας 6: Βελτιστοποιημένες τιμές των υψομετρικών διαφορών των σημείων εδάφους (2^η συνόρθωση)

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΔΗ	ΣΥΝΟΡΘΩΜΕΝΕΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ως προς το DIONA (m)	ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ $\sigma_{\hat{x}}$ (m)
ΔΗ DIONA -SR1	-3,2292	6,179E-04
ΔΗ DIONA -SR2	-9,0976	8,422E-04
ΔΗ DIONA -SR3	-13,4143	1,068E-03
ΔΗ DIONA -SR4	-18,7200	1,015E-03
ΔΗ DIONA -SR5	-16,3129	9,473E-04
ΔΗ DIONA -E	-22,7721	1,059E-03
ΔΗ DIONA -S	-10,1281	1,085E-03
ΔΗ DIONA -W	-4,8698	9,861E-04
ΔΗ DIONA -N	-13,3091	9,119E-04
ΔΗ DIONA -R	-1,4150	6,563E-04
ΔΗ DIONA -M	-1,9632	7,236E-04
ΔΗ DIONA -B	-8,6289	8,958E-04

Το τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης είναι ίσο με:

$$\sigma_0 = 1,9226E-04 \text{ m,}$$

ενώ ο πίνακας υπολοίπων που προκύπτει από τη νέα συνόρθωση είναι:

Πίνακας 7: Πίνακας υπολοίπων (2^η συνόρθωση)

ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ (u)
<i>ΔΗ SR4 -E</i>	1,840E-04
<i>ΔΗ E - B</i>	1,840E-04
<i>ΔΗ B -N</i>	1,568E-04
<i>ΔΗ N - M</i>	1,568E-04
<i>ΔΗ M – W</i>	9,137E-05
<i>ΔΗ W – S</i>	9,137E-05
<i>ΔΗ S – SR3</i>	9,137E-05
<i>ΔΗ SR3 – SR4</i>	-4,543E-04
<i>ΔΗ SR2 – B</i>	1,254E-05

$\Delta H SR2 - R$	-2,175E-05
$\Delta H R - DIONA$	-2,175E-05
$\Delta H B - SR5$	3,970E-05
$\Delta H DIONA - SR1$	4,373E-05
$\Delta H SR1 - SR2$	6,548E-05
$\Delta H SR2 - SR5$	5,294E-05
$\Delta H SR5 - SR4$	9,264E-05
$\Delta H SR4 - SR3$	-5,457E-04
$\Delta H M - DIONA$	6,548E-05

Συγκρίνοντας τις δύο συνορθώσεις, παρατηρείται ότι όσον αφορά στο τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης, αυτό προέκυψε να είναι τρεις φορές μικρότερο από το αρχικό, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά τη λύση του συστήματος, δηλαδή βοηθά στον προσδιορισμό των ορθομετρικών υψομέτρων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ως καταλληλότερη λύση επιλέχθηκε η δεύτερη, δηλαδή αυτή στην οποία δεν συμπεριλαμβάνεται στη συνόρθωση η παρατήρηση $\Delta H R - M$, καθώς εισάγει ένα σημαντικό σφάλμα που έχει αρνητική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα.

Με βάση τις παραπάνω συνορθωμένες υψομετρικές διαφορές και με γνωστό το ορθομετρικό υψόμετρο του σημείου DIONA, υπολογίστηκαν τα ζητούμενα ορθομετρικά υψόμετρα των σημείων του εδάφους:

Πίνακας 8: Ορθομετρικά υψόμετρα σημείων εδάφους

ΣΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ σ χ (m)
<i>DIONA</i>	<i>471,619</i>	<i>0,0000</i>
SR1	468,390	6,179E-04
SR2	462,521	8,422E-04
SR3	458,205	1,068E-03
SR4	452,899	1,015E-03
SR5	455,306	9,473E-04
E	448,847	1,059E-03
S	461,491	1,085E-03
W	466,749	9,861E-04
N	458,310	9,119E-04
R	470,204	6,563E-04
M	469,656	7,236E-04
B	462,990	8,958E-04

Αναφορικά με το υψόμετρο που θεωρείται γνωστό και σταθερό (DIONA), σημειώνεται ότι έχει προσδιοριστεί μέσω της υψομετρικής αφετηρίας R_{cp} , της οποίας το ορθομετρικό υψόμετρο έχει υπολογιστεί με ακρίβεια μέσα από μία σειρά διαχρονικών μετρήσεων στην περιοχή μελέτης. Πιο αναλυτικά, το 1975 στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας (Μ. Βλαχάκης, Π. Τσίπας, Π. Ψυχογιόπουλος) προσδιορίστηκε από γεωμετρική χωροστάθμηση το ορθομετρικό υψόμετρο του $R_{cp} = 472,350m$ και του σημείου cp : $H_{cp} = 474.815m$, από την υψομετρική αφετηρία της ΓΥΣ R_{137} , στη Νέα Μάκρη, με υψόμετρο $12,81m$. Σε επόμενο χρόνο, έγινε επαναπροσδιορισμός του H_{cp} και υπολογίστηκε να είναι ίσο με $H_{cp} = 474,682m$ (Β. Σαπουμίδης 1982). Το 1987 επιδιώχθηκε ο απευθείας υπολογισμός του $H_{DIONA} = 472,243m$, ο οποίος προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν το 1969 και συνορθώθηκαν το 1986. Οι μετρήσεις του 1969 επιδίωκαν τη σύνδεση των αφετηριών R_{136} και R_{137} (Μαραθώνας, Νέα Μάκρη) και του σημείου Α της πλατφόρμας Wegener (DIONA). Στις αρχές της δεκαετίας του '90 έγινε νέα συνόρθωση των μετρήσεων του '87 (ΓΥΣ), καθώς και νέα χωροστάθμηση από την υψομετρική αφετηρία R_{137} (Παπαοικονόμου). Τα τελικά ορθομετρικά υψόμετρα που προέκυψαν είναι τα εξής:

$$H_{cp} = 474,711m \quad H_{DIONA} = 471,619m$$

Τα υψόμετρα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προκειμένου να προσδιοριστεί το ζητούμενο τοπικό μοντέλο του γεωειδούς.

7.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ GPS

Το προϊόν που προκύπτει από την επίλυση πρωτογενών δεδομένων GPS (raw data) μεταξύ δύο σημείων είναι μία βάση (διάνυσμα), το οποίο ορίζει τη σχετική θέση μεταξύ αυτών των δύο σημείων στο χώρο ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$).

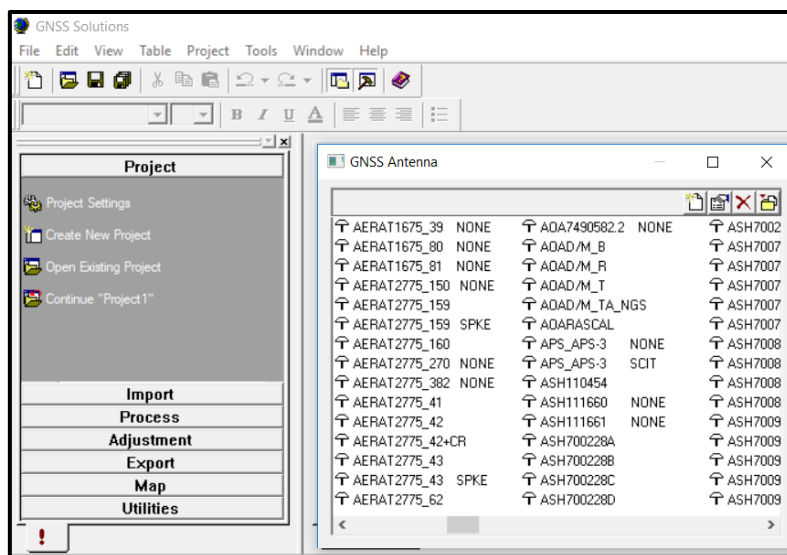
Σχετικά με την ποιότητα της επιλυμένης βάσης, σημειώνεται ότι εξαρτάται από τις αβεβαιότητες των βάσεων που έχουν δημιουργηθεί. Γενικά, οι αβεβαιότητες θα πρέπει να κυμαίνονται σε επίπεδα όμοια με αυτά των προδιαγραφών του δέκτη. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος πληροφοριών που έχουμε για μία βάση, τόσο μικρότερη θα είναι και η αβεβαιότητά της. Η απαραίτητη ποσότητα δεδομένων για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων, αναφέρεται από την κατασκευάστρια εταιρία του κάθε δέκτη στο εγχειρίδιο χρήσης του.

Ο τύπος επίλυσης δείχνει αν η επίλυση της ασάφειας φάσης για κάθε δορυφόρο έγινε με επιτυχία για κάθε βάση. Αν όλες οι ασάφειες προσδιορίστηκαν, τότε η λύση της βάσης θεωρείται Fixed (ambiguities Fixed to integers), δηλαδή οι ασάφειες των φάσεων έχουν επιλυθεί σε ακέραιο αριθμό κύκλων. Μία Fixed λύση είναι η καλύτερη δυνατή. Αν έχει λυθεί πάνω από το 50% των ασαφειών, τότε η λύση θεωρείται Partial. Μία βάση με λύση float σημαίνει πως δεν έχουν προσδιοριστεί όλες οι ασάφειες

φάσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η float λύση δεν είναι αξιόπιστη για δίκτυα υψηλής ακριβείας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των βάσεων είναι το GNSS Solutions. Για την έναρξη της επεξεργασίας ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Επιλέχθηκαν οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις:



Εικόνα 33: Εισαγωγή κεραίων μέτρησης στο GNSS Solutions

Κατά την επιλογή των κεραίων, συμπληρώθηκαν οι τιμές των διορθωμένων διαστάσεών τους, όπως δίνονται από την IGS Antenna Working Group.

7.4.1 IGS Antenna Working Group

Η IGS είναι μια υπηρεσία της Διεθνούς Ένωσης Γεωδαισίας (IAG), μιας από τις ενώσεις της Διεθνούς Ένωσης Γεωδαισίας και Γεωφυσικής (IUGG), και βασικού στοιχείου του Συστήματος Γεωφυσικής Παρακολούθησης (GGOS). Λειτουργεί ως εθελοντική ομοσπονδία που αυτοδιοικείται από τους συμμετέχοντες μέσω ενός εκλεγμένου διοικητικού συμβουλίου. Κάθε συμμετέχων οργανισμός συνεισφέρει τους δικούς του πόρους.

Η υπηρεσία αυτή λειτουργεί ένα παγκόσμιο δίκτυο σταθμών εδάφους GNSS, κέντρων δεδομένων και κέντρων ανάλυσης δεδομένων για την παροχή δεδομένων και παραγώγων δεδομένων που είναι απαραίτητα για την έρευνα της επιστήμης της γης - πολυεπιστημονικές εφαρμογές εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού (PNT).

Το τμήμα της IGS που καλείται IGS Antenna WG, διατηρεί τα αρχεία της IGS που σχετίζονται με τις πληροφορίες των δεκτών και των αντίστοιχων δορυφορικών κεραίων και δημιουργεί ένα σημείο επαφής στους χρήστες με τα προϊόντα της IGS. Το τμήμα

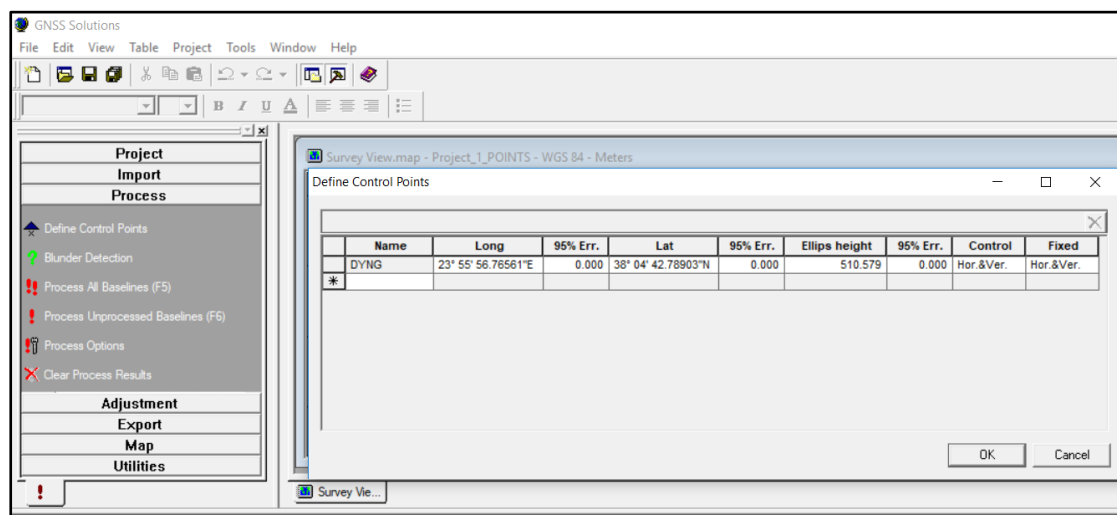
αυτό παρέχει δεδομένα που αφορούν ζητήματα του κέντρου φάσης των κεραιών, όπως για παράδειγμα το πλαίσιο αναφοράς τους, τα προϊόντα ρολογιού, βαθμονομήσεις. Τα στοιχεία αυτά χρησιμεύουν για τον επαναπροσδιορισμό ορισμένων τεχνικών παραμέτρων των δεκτών, οι οποίες με το πέρασμα των χρόνων διαφέρουν από τις αντίστοιχες που δίνονται από τον κατασκευαστή των οργάνων GPS, που χρησιμοποιούνται.

Ορισμένες από τις ευθύνες του τμήματος της IGS (IGS Antenna WG), σχετίζονται με:

- Τη συντήρηση του μοντέλου του δέκτη και της δορυφορικής κεραίας του, που περιλαμβάνει την ενημέρωση και προσθήκη πληροφοριών που θα διασφαλίσουν την εσωτερική συνέπεια των δορυφορικών μοντέλων και του αντίστοιχου επίγειου πλαισίου αναφοράς.
- Τη διατήρηση σχετικών αρχείων που διατίθενται στους χρήστες όπως οι rcvr_ant.tab και antenna.gra.
- Τον καθορισμό κανόνων και συστάσεων για τα αρχεία των μοντέλων κεραιών της IGS.
- Την προώθηση της βαθμονόμησης πριν την εκτόξευση των κεραιών πομπού.

[<https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202023633-Antenna-Working-Group-Charter-and-Members>].

2. Εισήχθησαν οι συντεταγμένες του σταθερού (γνωστού) σημείου DYNG:



Εικόνα 34: Εισαγωγή των Καρτεσιανών συντεταγμένων του γνωστού/σταθερού σημείου DYNG

Το εν λόγω σταθερό σημείο ανήκει στο δίκτυο της IGS (Intern. GNSS Service) και της EUREF (European Reference). Οι συντεταγμένες του επαναπροσδιορίστηκαν, ώστε να «προβληθούν» στο χρόνο των μετρήσεων, στο πλαίσιο αναφοράς ITRF2014. Οι διορθωτικοί συντελεστές αφορούν τις τεκτονικές ταχύτητες στις τρεις διαστάσεις και

ο υπολογισμός τους στο σύστημα αναφοράς IGB08R, με ελλειψοειδές το GRS 80, έχει προκύψει από μία χρονοσειρά μετρήσεων 20 ετών. Οι τελικές τιμές των τεκτονικών ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

$$V\phi = -0'',00038/y \quad V\lambda = 0'',00032/y \quad Vh = 0,57\text{mm/y}$$

Συντεταγμένες σταθερού σημείου

$$DYNG: \phi = 38^\circ 04' 42'',78903 \quad \lambda = 23^\circ 55' 56'',76561 \quad h = 510,579\text{m}$$

Ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο σημείο αυτό είναι ο Trimble Net R9, με κεραία της ίδιας εταιρίας TRM59800.

Για κάθε ζεύγος δεκτών (γραμμικός συνδυασμός), ορίζεται μία βάση GPS και προσδιορίζεται η σχετική τους θέση, δηλαδή οι συνιστώσες ΔX , ΔY , ΔZ . Προσθέτοντας τις διαφορές αυτές στις συντεταγμένες του γνωστού σημείου (DYNG), προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των άγνωστων σημείων στο σύστημα αναφοράς του γνωστού.

3. Εισήχθησαν τα αρχεία τύπου RINEX που αποθηκεύτηκαν στους δέκτες GPS κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.
4. Διορθώθηκαν και εισήχθησαν τα ύψη των κεραιών. Με τον όρο διόρθωση εννοείται η αναγωγή των υψών που μετρήθηκαν, από την κεκλιμένη απόσταση στη βάση της κεραίας (BOAM: Bottom of Antenna Mount), στην κατακόρυφη και έπειτα στο κέντρο της κεραίας (ανάλογα με τον τύπο της και το αντίστοιχο εγχειρίδιο του κατασκευαστή).

Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων, επιλύθηκαν οι βάσεις με δύο τρόπους: α) επίλυση όλων των δυνατών συνδυασμών των βάσεων και β) επίλυση των βάσεων ακτινικά, ως προς το σταθερό σημείο DYNG. Την επίλυση των βάσεων ακολούθησε η συνόρθωσή τους, η οποία πραγματοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MatLab, από όπου προέκυψαν οι τελικές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου που έχει δημιουργηθεί.

Η συνόρθωση των μετρήσεων είναι μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες, καθώς μέσω αυτής επιδιώκεται ο προσδιορισμός ακριβών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Μέσω της εφαρμογής της MET επιδιώκεται να επιτευχθούν δύο αποτελέσματα:

- Για να γίνει έλεγχος για τυχαία και συστηματικά σφάλματα στις παρατηρήσεις (διανύσματα μεταξύ των σημείων)
- Για να υπολογιστούν οι τελικές συντεταγμένες των σημείων μελέτης, που βρίσκονται σε αρμονία με τα σημεία ελέγχου που χρησιμοποιεί ο εκάστοτε χρήστης.

Οι συντεταγμένες που προέκυψαν από την επίλυση είναι Καρτεσιανές Συντεταγμένες και χρειάστηκε να μετατραπούν σε Γεωδαιτικές, ώστε να προσδιοριστεί το ζητούμενο γεωμετρικό υψόμετρο (h).

Έχοντας, πλέον γνωστά τα υψόμετρα, ορθομετρικά και γεωμετρικά, για κάθε σημείο του εδάφους, προσδιορίζονται τα υψόμετρα του γεωειδούς N, και συνεπώς προκύπτει ένα τοπικό μοντέλου κλίσεων της περιοχής μελέτης του ΚΔΔ. [<http://www.geotech.gr/>].

- ***Συνδυαστική επίλυση των διανυσματικών βάσεων***

Κατά το στάδιο αυτό επιδιώχθηκε η επίλυση των διανυσματικών βάσεων (ΔX , ΔY , ΔZ) που δημιουργήθηκαν, με όλους τους δυνατούς, μεταξύ τους συνδυασμούς. Δεδομένης της ύπαρξης των δεκατριών (13) κορυφών του δικτύου, οι συνδυασμένες βάσεις που προέκυψαν είναι πενήντα- τέσσερις (54). Το αποτέλεσμα της επίλυσης ήταν ο προσδιορισμός διανυσμάτων ως προς το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς WGS84 (Processed ECEF WGS84 DX component, Processed ECEF WGS84 DY component, Processed ECEF WGS84 DZ component). Οι τιμές αυτές στη συνέχεια συνορθώθηκαν προκειμένου να υπολογιστεί η καλύτερη τιμή των παραμέτρων εντοπισμού της θέσης των σημείων (X, Y, Z), ως προς το σταθερό, με γνωστές συντεταγμένες σημείο της περιοχής (DYNG).

Τόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συνόρθωση (πίνακας υπολοίπων, τυπικό σφάλμα σ0), όσο και αυτά που δίνονται από το πρόγραμμα επίλυσης (GNSS Solutions), υποδεικνύουν ότι μία ή περισσότερες βάσεις υποβαθμίζουν την ποιότητα του δικτύου, όσον αφορά την ακρίβειά του. Πιο αναλυτικά παρατηρήθηκε ότι τέσσερις βάσεις από τις πενήντα- τέσσερις που επιλύθηκαν (4/54), παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα, ο ισομερισμός των οποίων μέσω της εφαρμογής των MET χειροτερεύει τη λύση του συστήματος.

Για τις βάσεις αυτές, που θεωρήθηκαν «προβληματικές», κρίθηκε σκόπιμο να αφαιρεθούν από το δίκτυο, ώστε αυτό συνορθωθεί ξανά, αναμένοντας να αποδοθεί μία καλύτερη λύση.

Workbook1 - Telko Andr - WGS 84 - Meters																
Refer	Rover	Start_Time	Proc_QA	Solution	Proc_Length	Proc_Length_Conf	Proc_DX	Proc_DX_Conf	Proc_DY	Proc_DY_Conf	Proc_DZ	Proc_DZ_Conf	Time_Span	SVs	PDOP	Dynamic
25	DYNG SR1	November 16 2018 11:21:30.00	✓	Fixed	48.864	0.002	-17.621	0.001	44.879	0.001	-7.937	0.001	01:56:15.00	9	1.8	
26	DIONA SR1	November 15 2018 13:11:30.00	✓	Fixed	47.020	0.001	-14.112	0.001	43.409	0.001	-11.289	0.000	00:34:30.00	9	2.0	
27	DYNG SR5	November 15 2018 12:10:00.00	✓	Fixed	153.010	0.002	-67.437	0.001	136.126	0.001	-18.275	0.001	00:43:00.00	9	1.8	
28	DYNG SR5	November 16 2018 13:21:15.00	✓	Fixed	153.013	0.026	-67.459	0.016	136.119	0.009	-18.270	0.001	00:52:15.00	11	1.5	
29	B SR5	November 16 2018 13:28:45.00	✓	Fixed	84.691	0.040	3.098	0.025	67.540	0.012	-51.003	0.001	00:44:00.00	9	1.8	
30	DYNG W	November 14 2018 14:49:15.00	✓	Fixed	86.117	0.012	Processed ECEF WGS84 DX component		-69.723	0.003	-23.807	0.000	00:43:30.00	10	1.5	
31	DYNG W	November 16 2018 11:44:15.00	✓	Fixed	86.117	0.002			-69.724	0.001	-23.805	0.001	00:35:00.00	9	2.1	
32	R W	November 14 2018 14:49:15.00	✓	Fixed	57.130	0.025	18.070	0.012	-54.180	0.013	1.343	0.000	00:43:30.00	9	1.6	
33	SR1 W	November 16 2018 11:44:15.00	✓	Fixed	131.364	0.002	62.206	0.001	-114.608	0.001	-15.889	0.001	00:35:00.00	9	2.1	
34	S W	November 16 2018 11:44:15.00	✓	Fixed	106.203	0.002	7.247	0.001	-94.063	0.001	48.772	0.000	00:33:45.00	9	2.1	
35	DYNG E	November 14 2018 12:22:45.00	✓	Fixed	202.510	0.017	-109.283	0.007	170.476	0.009	2.306	0.000	00:58:00.00	11	1.4	
36	DYNG E	November 16 2018 12:29:30.00	✓	Fixed	202.522	0.004	-109.286	0.002	170.489	0.001	2.304	0.000	00:40:45.00	11	1.4	
37	DIONA E	November 14 2018 12:55:30.00	✓	Fixed	199.389	0.006	-105.770	0.003	169.020	0.002	-1.040	0.000	00:25:15.00	9	2.0	
38	SR1 E	November 16 2018 12:29:30.00	✓	Fixed	155.830	0.031	-91.650	0.014	125.612	0.016	10.243	0.001	00:40:45.00	9	1.8	
39	B E	November 14 2018 12:22:45.00	✓	Fixed	113.210	0.051	-38.803	0.027	101.904	0.023	-30.438	0.004	00:25:30.00	9	1.8	
40	DYNG S	November 14 2018 15:47:00.00	✓	Fixed	85.174	0.005	37.335	0.003	24.338	0.002	-72.583	0.000	00:35:00.00	10	1.4	
41	DYNG S	November 16 2018 11:36:00.00	✓	Fixed	85.171	0.003	37.338	0.002	24.339	0.001	-72.579	0.000	00:42:00.00	11	1.4	
42	R S	November 14 2018 15:47:00.00	✓	Fixed	62.911	0.005	10.835	0.003	39.881	0.002	-47.434	0.000	00:35:00.00	9	1.6	
43	SR1 S	November 16 2018 11:36:00.00	✓	Fixed	87.298	0.003	54.957	0.002	-20.546	0.001	-64.642	0.000	00:42:00.00	9	2.1	
44	DYNG SR4	November 15 2018 11:16:30.00	✓	Fixed	163.819	0.002	-17.291	0.001	140.285	0.001	-82.812	0.000	01:32:00.00	11	1.4	
45	B SR4	November 15 2018 11:20:30.00	✓	Fixed	146.034	0.005	53.193	0.003	71.706	0.002	-115.563	0.000	00:26:45.00	9	2.5	
46	SR5 SR4	November 15 2018 12:10:00.00	✓	Fixed	81.836	0.004	50.146	0.002	4.158	0.001	-64.539	0.000	00:38:30.00	9	1.8	
47	SR3 SR4	November 15 2018 11:16:30.00	✓	Fixed	71.303	0.004	-34.628	0.002	62.328	0.002	-0.463	0.000	00:29:45.00	9	2.5	
48	SR2 SR4	November 15 2018 11:56:30.00	✓	Fixed	80.661	0.024	5.369	0.010	60.435	0.014	-53.150	0.000	00:52:00.00	9	1.8	
49	DYNG M	November 15 2018 14:49:00.00	✓	Fixed	48.373	0.002	8.890	0.001	-46.385	0.001	10.457	0.001	00:35:30.00	9	1.6	
50	DYNG M	November 16 2018 13:31:00.00	✓	Fixed	48.373	0.002	8.885	0.001	-46.388	0.000	10.450	0.001	00:35:30.00	9	1.9	
51	DIONA M	November 15 2018 14:49:00.00	✓	Fixed	49.945	0.002	12.401	0.001	-47.856	0.001	7.110	0.001	00:35:30.00	9	1.6	
52	R M	November 15 2018 14:49:00.00	✓	Fixed	50.291	0.002	-17.605	0.001	-30.835	0.001	35.615	0.001	00:35:30.00	9	1.6	
53	B M	November 16 2018 13:31:00.00	✓	Fixed	141.476	0.002	79.364	0.001	-114.977	0.001	-22.296	0.001	00:35:30.00	9	1.9	
54	SR5 M	November 16 2018 13:31:00.00	✓	Fixed	199.899	0.002	76.304	0.001	-182.518	0.001	28.715	0.000	00:35:30.00	9	1.9	
Files / Occupations / Points / Control Positions / Vectors / Repeat vectors / Loop Closure / Control Tie / Adjustment Analysis																

Εικόνα 35: Βάσεις με σημαντικά σφάλματα (ΔX, ΔY, ΔZ)

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία της ελαχιστοτετραγωνικής συνόρθωσης, προέκυψε ότι το τυπικό σφάλμα των μετρήσεων είναι ίσο με:

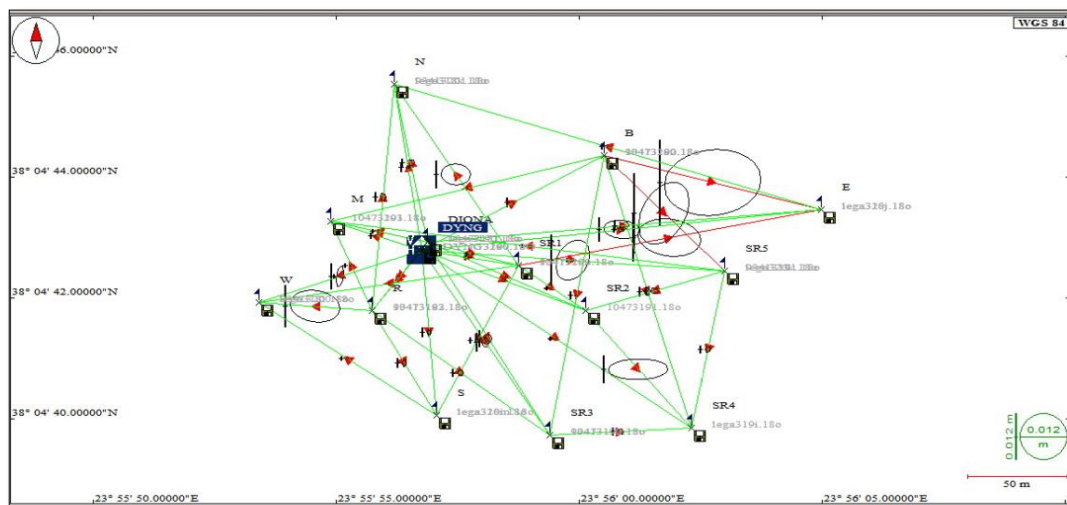
$$\sigma_0 = 0,00435 \text{ m,}$$

ενώ οι καλύτερες τιμές των γεωδαιτικών συντεταγμένων, που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις πενήντα, πλέον, βάσεις (50) αναγράφονται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (συνδυαστική επίλυση)

ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΩΝ ΒΑΣΕΩΝ		
	φ (DMS)	λ (DMS)	h (m)
SR1	38° 04' 42,54417"N	23° 55' 58,74179"E	507,334
SR2	38° 04' 41,79805"N	23° 56' 00,13699"E	501,484
SR3	38° 04' 39,73711"N	23° 55' 59,40038"E	497,163
SR4	38° 04' 39,85264"N	23° 56' 02,31396"E	491,865
SR5	38° 04' 42,45068"N	23° 56' 02,99259"E	494,266
E	38° 04' 43,46266"N	23° 56' 04,97765"E	487,815
S	38° 04' 40,05596"N	23° 55' 57,05673"E	500,447
W	38° 04' 41,93178"N	23° 55' 53,40879"E	505,705
N	38° 04' 45,53073"N	23° 55' 56,20031"E	497,275
R	38° 04' 41,78845"N	23° 55' 55,74143"E	509,162
M	38° 04' 43,26967"N	23° 55' 54,87805"E	508,606
B	38° 04' 44,35695"N	23° 56' 00,51044"E	501,964
DIONA	38° 04' 42,92659"N	23° 55' 58,87906"E	510,585

Στην προκειμένη περίπτωση το επιλυμένο δίκτυο έχει την μορφή που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 36: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου με συνδυασμό των μετρημένων θάσεων

Τα διανύσματα που παρουσιάζονται ως πράσινα/ κόκκινα τμήματα εξαρτώνται κάθε φορά με το αν «πέρασαν» ή «απέτυχαν» από τη δοκιμή QA του προγράμματος. Το σχήμα και το μέγεθος των ελλείψεων σφάλματος καθώς και των καθέτων σφαλμάτων (κάθετα τμήματα) για κάθε διάνυσμα, παριστάνονται σε μέση απόσταση κατά μήκος του διανύσματος. Στην κάτω δεξιά άκρη της εικόνας, αναγράφεται η μέγιστη τιμή τους, βάσει της οποίας αξιολογείται το μέγεθός τους. [<http://engineersinaction.org/wp-content/uploads/2017/01/GNSS-User-Manual.pdf>].

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι οι ελλείψεις σφάλματος που δημιουργούνται δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς δεν είναι με σαφήνεια διατυπωμένος ο τρόπος που δημιουργούνται από το πρόγραμμα του GNSS Solutions.

- **Ακτινική επίλυση θάσεων ως προς το σημείο DYNG**

Με την εφαρμογή της ακτινικής επίλυσης των θάσεων ως προς το σταθερό σημείο DYNG, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των κορυφών του υλοποιημένου δικτύου, αποκλειστικά από τα διανύσματα που τις ενώνουν με αυτό:

$$\Delta X_{DYNG-i} = X_i - X_{DYNG} \quad \Delta Y_{DYNG-i} = Y_i - Y_{DYNG} \quad \Delta Z_{DYNG-i} = Z_i - Z_{DYNG},$$

,όπου i η εκάστοτε κορυφή του δικτύου.

Με τη μέθοδο αυτή, εξασφαλίζεται ο προσδιορισμός των ζητούμενων συντεταγμένων με μικρότερο σφάλμα, καθώς για κάθε σημείο δεν εμπλέκονται περισσότερα από δύο σημεία και συνεπώς δεν υπεισέρχεται κάποιο επιπρόσθετο σφάλμα που χρήζει ισομερισμού.

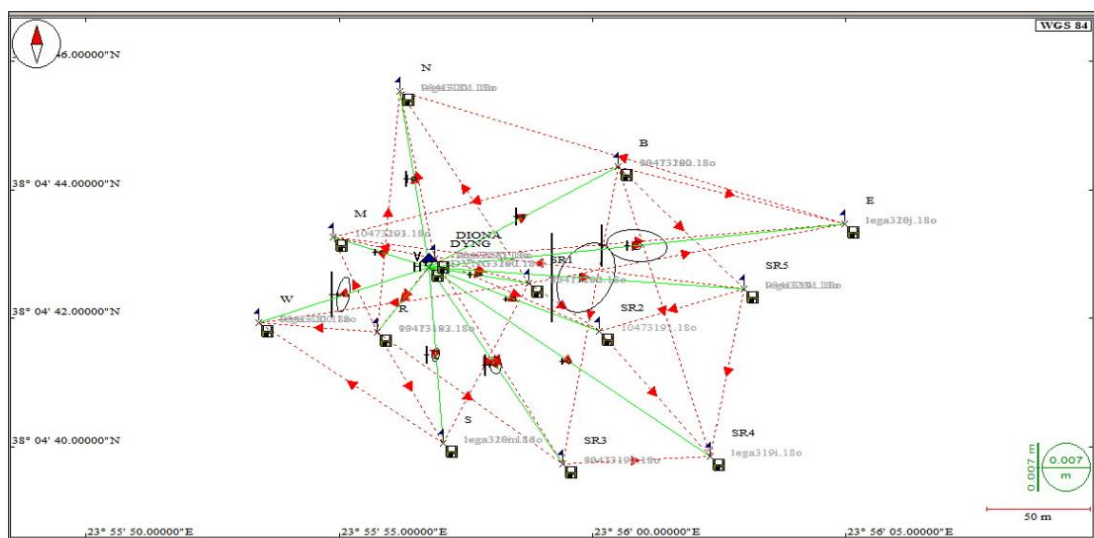
Όμοια με την προηγούμενη μέθοδο αρχικά, από την επίλυση των είκοσι- πέντε (25) αυτή τη φορά βάσεων, υπολογίστηκαν τα εν λόγω διανύσματα ως προς το γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς WGS84 (Processed ECEF WGS84 DX component, Processed ECEF WGS84 DY component, Processed ECEF WGS84 DZ component), τα οποία στη συνέχεια επιλύθηκαν μέσω του προγράμματος GNSS Solutions και έδωσαν τις συντεταγμένες στις κορυφές του δικτύου ελέγχου (μοναδιαία λύση).

Τα αποτελέσματα της συνόρθωσης είναι:

Πίνακας 10: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (ακτινική επίλυση ως προς το DYNG)

ΣΗΜΕΙΟ	ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΩΝ ΒΑΣΕΩΝ		
	φ (DMS)	λ (DMS)	h (m)
SR1	38° 04' 42,54441"N	23° 55' 58,74187"E	507,337
SR2	38° 04' 41,79825"N	23° 56' 00,13701"E	501,485
SR3	38° 04' 39,73731"N	23° 55' 59,40046"E	497,155
SR4	38° 04' 39,85284"N	23° 56' 02,31407"E	491,863
SR5	38° 04' 42,45142"N	23° 56' 02,99286"E	494,243
E	38° 04' 43,46242"N	23° 56' 04,97791"E	487,814
S	38° 04' 40,05615"N	23° 55' 57,05689"E	500,453
W	38° 04' 41,93192"N	23° 55' 53,40888"E	505,713
N	38° 04' 45,53090"N	23° 55' 56,20046"E	497,275
R	38° 04' 41,78863"N	23° 55' 55,74156"E	509,158
M	38° 04' 43,26975"N	23° 55' 54,87819"E	508,604
B	38° 04' 44,35701"N	23° 56' 00,51059"E	501,960
DIONA	38° 04' 42,92675"N	23° 55' 56,87918"E	510,584

Στην προκειμένη περίπτωση το επιλυμένο δίκτυο έχει την μορφή που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 37):



Εικόνα 37: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου με ακτινική λύση των βάσεων ως προς το DYNG

Στην παραπάνω εικόνα, τα διανύσματα που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, δεν έχουν συμπεριληφθεί στην επίλυση, ούτε και στην τελική συνόρθωση, καθόσον επιλέχθηκε να επιλυθούν αποκλειστικά τα διανύσματα που συνδέουν απευθείας τις εκάστοτε κορυφές με το σημείο DYNG (διανύσματα πράσινου χρώματος). Στην κάτω δεξιά γωνία της εικόνας, επαληθεύεται ότι η τιμή των ελλείψεων σφάλματος είναι σχεδόν η μισή από αυτή που προέκυψε από τη συνδυαστική λύση των βάσεων.

- **Επίλυση και συνόρθωση δικτύου στο GNSS**

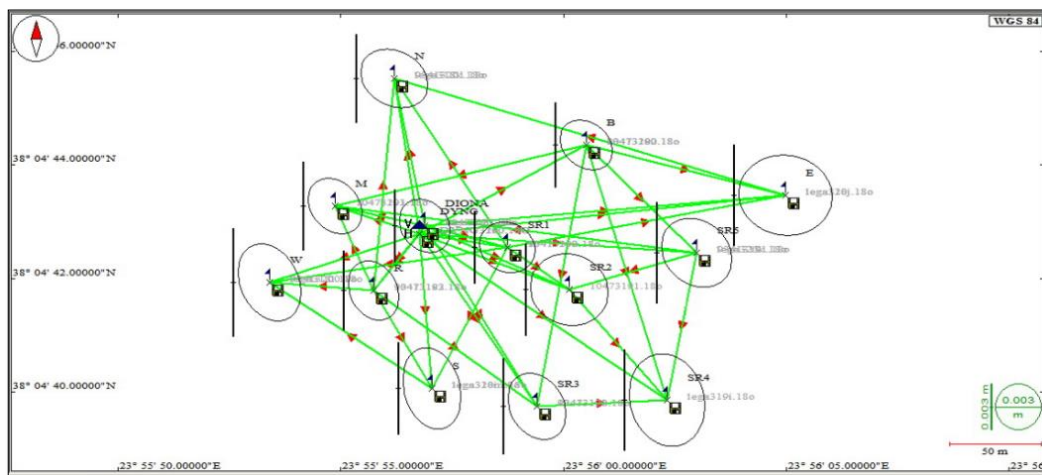
Το λογισμικό του GNSS παρέχει τη δυνατότητα πέραν της επίλυσης των βάσεων, ανάλογα με τις καθορισμένες από το χρήστη, παραμέτρους και της συνόρθωσής τους. Έχοντας καθορίσει το σταθερό, με γνωστές συντεταγμένες, σημείο και εκτελώντας τις ανάλογες εντολές (Adjustment Analysis, adjustment network), πραγματοποιείται η συνόρθωση των διανυσματικών βάσεων από το GNSS Solutions και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

Πίνακας 11: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (GNSS adjustment)

ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ GNSS		
	φ (DMS)	λ (DMS)	h (m)
SR1	38° 04' 42,54435"N	23° 55' 58,74195"E	507,334
SR2	38° 04' 41,79823"N	23° 56' 00,13712"E	501,483
SR3	38° 04' 39,73731"N	23° 55' 59,40054"E	497,161
SR4	38° 04' 39,85281"N	23° 56' 02,31412"E	491,865
SR5	38° 04' 42,45082"N	23° 56' 02,99272"E	494,266
E	38° 04' 43,46240"N	23° 56' 04,97790"E	487,816
S	38° 04' 40,05611"N	23° 55' 57,05684"E	500,448

W	38° 04' 41,93189"N	23° 55' 53,40885"E	505,708
N	38° 04' 45,53087"N	23° 55' 56,20044"E	497,276
R	38° 04' 41,78865"N	23° 55' 55,74157"E	509,161
M	38° 04' 43,26984"N	23° 55' 54,87817"E	508,606
B	38° 04' 44,35713"N	23° 56' 00,51057"E	501,964
DIONA	38° 04' 42,92675"N	23° 55' 56,87920"E	510,586

Στην προκειμένη περίπτωση το επιλυμένο δίκτυο έχει την μορφή που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 38: Αποτέλεσμα επίλυσης του δικτύου στο GNSS

Από τη μορφή που έχει το δίκτυο στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται ότι όλα τα διανύσματα, έχουν ίδιας τάξης σφάλματα (έλλειψη σφάλματος και κάθετο σφάλμα), ενώ η μέγιστη τιμή τους δεν ξεπερνά τα 0,003m/50m. Το σφάλμα αυτό φαίνεται να είναι μικρότερο από κάθε προηγούμενο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενες λύσεις. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι δεν είναι γνωστός ο αλγόριθμος της συνόρθωσης που υλοποιεί το πρόγραμμα, δεν μπορεί να θεωρηθεί, πλήρως, σωστό. Η συνόρθωση του δικτύου στο GNSS έγινε για εκπαιδευτικούς λόγους, προκειμένου να γίνει έλεγχος των τελικών αποτελεσμάτων και να διακριθούν οι αποκλίσεις του συγκριτικά με τις παραπάνω επιλύσεις.

7.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ GPS

Ολοκληρώνοντας τις πιο πάνω μεθόδους προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων του εδάφους, εντοπίστηκαν οι διαφορές που παρουσιάζουν στις τρεις διαστάσεις (οριζοντιογραφικά- υψομετρικά).

Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων: all baselines – ακτινικής επίλυσης (DYNG)

ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΩΝ ΒΑΣΕΩΝ – ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ		
	$\Delta\phi$ (m)	$\Delta\lambda$ (m)	Δh (m)
SR1	-0,007	-0,002	-0,003
SR2	-0,006	-0,001	-0,001
SR3	-0,006	-0,002	0,008
SR4	-0,006	-0,003	0,002
SR5	-0,023	-0,008	0,023
E	-0,005	-0,008	0,001
S	-0,006	-0,005	-0,006
W	-0,004	-0,003	-0,008
N	-0,005	-0,005	0,000
R	-0,006	-0,004	0,004
M	-0,002	-0,004	0,002
B	-0,002	-0,005	0,004
DIONA	-0,005	-0,004	0,001

Πίνακας 13: Σύγκριση αποτελεσμάτων: all baselines – GNSS adjustment

ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΩΝ ΒΑΣΕΩΝ – ΣΥΝΟΡΘΩΣΗ GNSS		
	$\Delta\phi$ (m)	$\Delta\lambda$ (m)	Δh (m)
SR1	-0,005	-0,004	0,000
SR2	-0,005	-0,004	0,001
SR3	-0,006	-0,005	0,002
SR4	-0,005	-0,005	0,000
SR5	-0,004	-0,004	0,000
E	-0,004	-0,008	-0,001
S	-0,005	-0,003	-0,001
W	-0,003	-0,002	-0,003
N	-0,004	-0,004	-0,001
R	-0,006	-0,004	0,001
M	-0,005	-0,004	0,000
B	-0,005	-0,004	0,000
DIONA	-0,005	-0,004	-0,001

Αναφορικά με τον Πίνακα 12 σημειώνεται ότι στην πλειοψηφία τους, οι διαφορές που παρουσιάζονται δεν ξεπερνούν τα μερικά χιλιοστά, γεγονός που αποδεικνύει ότι ήταν δυνατό να γίνει απευθείας χρήση των πρωτογενών μετρήσεων, χωρίς να συνορθωθούν. Η εφαρμογή ή όχι της συνόρθωσης των μετρήσεων εξαρτάται κάθε φορά από την εκάστοτε εργασία και την επιθυμητή ακρίβεια. Στην περίπτωση μας και παρά τις μη σημαντικές μεταβολές των αρχικών μετρήσεων η συνόρθωση θεωρήθηκε χρήσιμη, καθώς επιβεβαιώθηκε και η ακρίβεια των μετρήσεων.

Στον Πίνακα 13 οι αντίστοιχες διαφορές παρουσιάζονται πολύ μικρότερες, όμως δεδομένου ότι δεν γνωρίζουμε τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το GNSS Solutions για τη συνόρθωση, δεν λαμβάνονται υπόψη. Ο προσδιορισμός των διαφορών αυτών πραγματοποιήθηκε για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

7.6 ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΛΥΣΗ GPS

Εφόσον ολοκληρώθηκε το στάδιο της επεξεργασίας και των συγκρίσεων των συνορθωμένων τιμών των συντεταγμένων των σημείων του εδάφους, οι τελικές συντεταγμένες που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του μοντέλου κλίσεων του γεωειδούς για το Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου είναι:

Πίνακας 14: Γεωδαιτικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου (τελικές)

ΣΗΜΕΙΟ	φ (DMS)	σN (m)	λ (DMS)	σE (m)	h (m)	σUp (m)
SR1	38° 04' 42,54417"N	0,0018	23° 55' 58,74179"E	0,0018	507,334	0,0018
SR2	38° 04' 41,79805"N	0,0022	23° 56' 00,13699"E	0,0022	501,484	0,0022
SR3	38° 04' 39,73711"N	0,0019	23° 55' 59,40038"E	0,0019	497,163	0,0019
SR4	38° 04' 39,85264"N	0,0022	23° 56' 02,31396"E	0,0022	491,865	0,0022
SR5	38° 04' 42,45068"N	0,0024	23° 56' 02,99259"E	0,0024	494,266	0,0024
E	38° 04' 43,46266"N	0,0023	23° 56' 04,97765"E	0,0023	487,815	0,0023
S	38° 04' 40,05596"N	0,0021	23° 55' 57,05673"E	0,0021	500,447	0,0021
W	38° 04' 41,93178"N	0,0021	23° 55' 53,40879"E	0,0021	505,705	0,0021
N	38° 04' 45,53073"N	0,0019	23° 55' 56,20031"E	0,0019	497,275	0,0019
R	38° 04' 41,78845"N	0,0017	23° 55' 55,74143"E	0,0017	509,162	0,0017
M	38° 04' 43,26967"N	0,0019	23° 55' 54,87805"E	0,0019	508,606	0,0019
B	38° 04' 44,35695"N	0,0019	23° 56' 00,51044"E	0,0019	501,964	0,0019
DIONA	38° 04' 42,92659"N	0,0016	23° 55' 58,87906"E	0,0016	510,585	0,0016

Πίνακας 15: Γεωκεντρικές συντεταγμένες κορυφών δικτύου

ΣΗΜΕΙΟ	X (m)	σ_X (m)	Y (m)	σ_Y (m)	Z (m)	σ_Z (m)
SR1	4595202,425	0,0018	2039479,055	0,0018	3912617,990	0,0018
SR2	4595197,390	0,0022	2039514,025	0,0022	3912596,271	0,0022
SR3	4595237,388	0,0019	2039512,135	0,0019	3912543,582	0,0019
SR4	4595202,759	0,0022	2039574,461	0,0022	3912543,119	0,0022
SR5	4595152,616	0,0024	2039570,303	0,0024	3912607,661	0,0024
E	4595110,763	0,0023	2039604,661	0,0023	3912628,235	0,0023
S	4595257,381	0,0021	2039458,511	0,0021	3912553,347	0,0021
W	4595264,628	0,0021	2039364,449	0,0021	3912602,121	0,0021
N	4595168,403	0,0019	2039396,183	0,0019	3912684,276	0,0019
R	4595246,543	0,0017	2039418,626	0,0017	3912600,774	0,0017
M	4595228,932	0,0019	2039387,787	0,0019	3912636,383	0,0019
B	4595149,563	0,0019	2039502,757	0,0019	3912658,678	0,0019
DIONA	4595216,535	0,0016	2039435,645	0,0016	3912629,277	0,0016

Σχετικά με τις αβεβαιότητες που συνοδεύουν τις συντεταγμένες των σημείων του εδάφους, παρατηρείται ότι σε τιμή ισχύει:

$$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = \sigma_N = \sigma_E = \sigma_{Up}$$

Για την παραπάνω ισότητα σημειώνονται τα εξής:

- Η ισότητα $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z$ δικαιολογείται, καθώς κατά τη συνόρθωση του δικτύου, μέσω της ελαχιστοτετραγωνικής μεθόδου δεν υπεισέρχονται οι παρατηρήσεις (ΔH) στη δημιουργία των χρησιμοποιούμενων πινάκων (A: Πίνακας σχεδιασμού, A^T : Ανάστροφος πίνακας σχεδιασμού) και συνεπώς ανά σημείο (X, Y, Z) οι μεταβλητότητες προκύπτουν ίσες.
- Η ισότητα $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = \sigma_N = \sigma_E = \sigma_{Up}$ δικαιολογείται, καθώς, εφόσον οι μεταβλητότητες κατά X, Y, Z παρουσιάζονται να είναι ίσες, υποδηλώνεται ο σχηματισμός σφαίρας. Συνεπώς, οποιαδήποτε μετατροπή και στροφή του συστήματος αυτού, δίνει αποτέλεσμα σφαίρας ίδιων διαστάσεων.

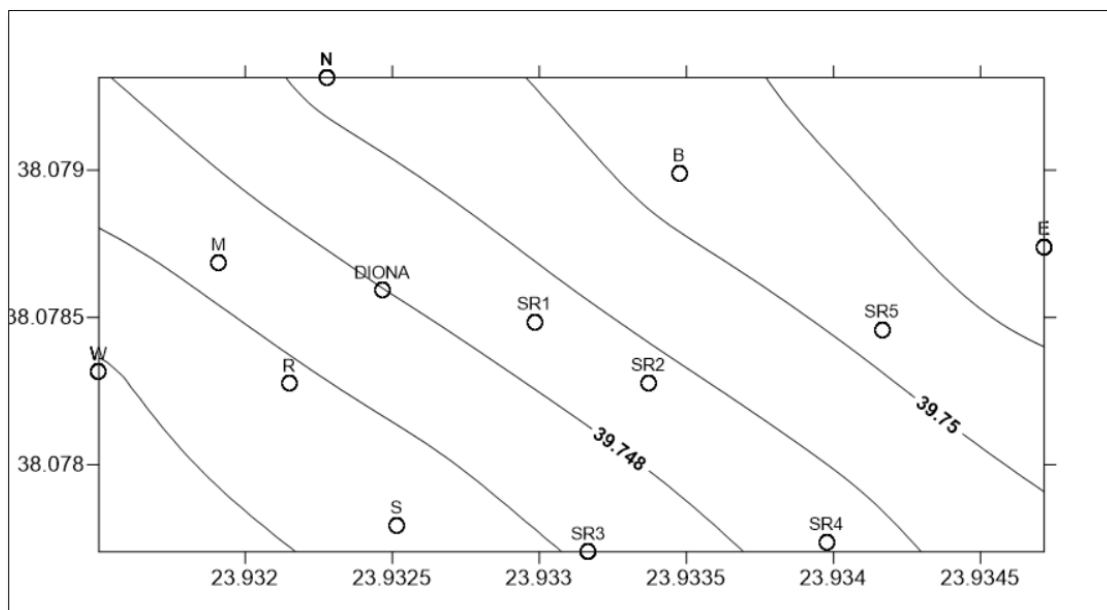
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΠΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων που προηγήθηκαν και αφορούν στη δημιουργία ενός τοπικού μοντέλου του γεωειδούς, για το ΚΔΔ. Με γνωστά, πλέον, τα ορθομετρικά και γεωμετρικά υψόμετρα των σημείων του εδάφους και συνεπώς τα αντίστοιχα ύψη γεωειδούς, προκύπτει μία μέση τιμή για την περιοχή μελέτης, η οποία προσεγγίζει τα 38,96 μέτρα. Το εύρος των υψών του γεωειδούς που προσδιορίστηκαν κυμαίνεται περίπου στα τρία εκατοστά (3cm). Στην ενότητα 8.1 παρουσιάζεται μια σειρά γραφημάτων που αποδίδουν το γεωειδές στην περιοχή, όπως αυτό δίνεται από τα παγκόσμια μοντέλα (EGM96, EGM2008 και EIGEN -6C4), ενώ στην ενότητα 8.2 παρουσιάζεται το τοπικό μοντέλο του γεωειδούς του ΚΔΔ, βασισμένο σε ορισμένες παραδοχές βελτιστοποίησης της μορφής του.

8.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΔΔ

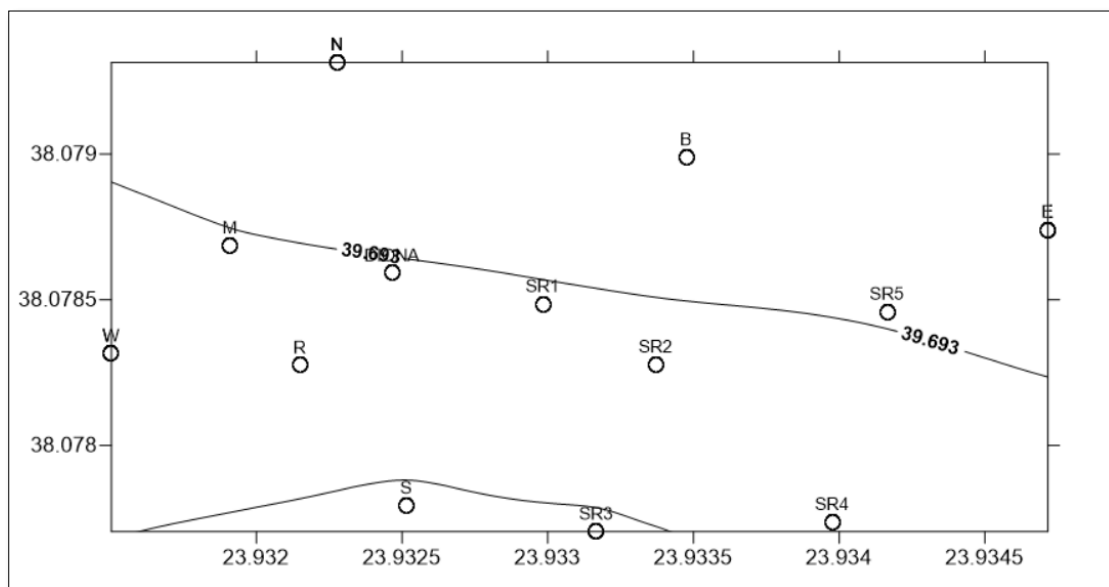
Πριν παρουσιαστούν τα μοντέλα που προκύπτουν από τις μετρήσεις που υλοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η μορφή του γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, όπως αυτή αποδίδεται από τα παγκόσμια μοντέλα γεωειδούς (EGM96, EGM2008, EIGEN-6C4).

- Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM96



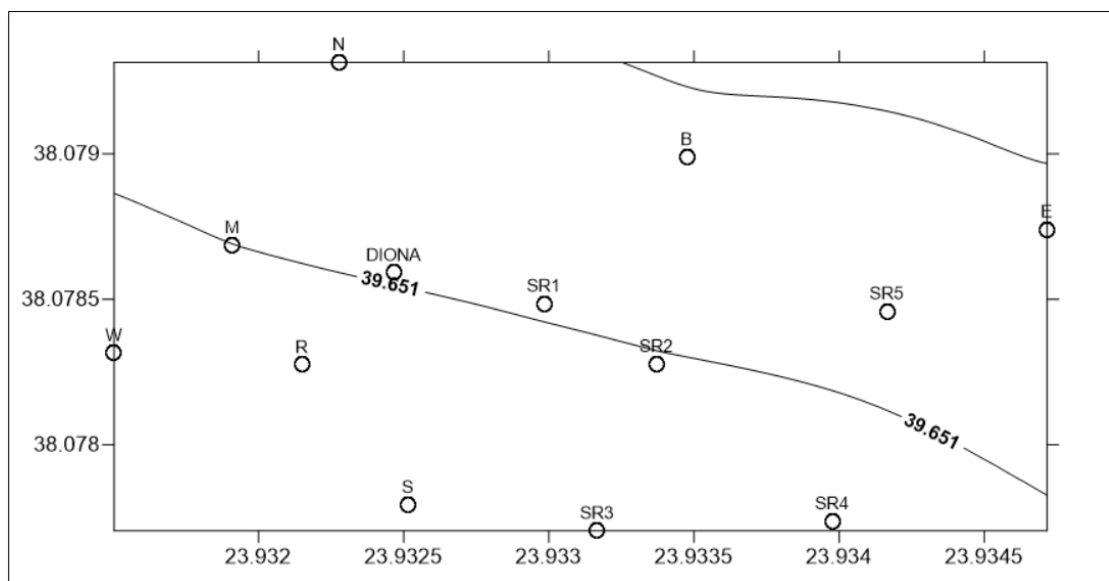
Εικόνα 39: Μοντέλο EGM96 για το ΚΚΔ

- Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EGM2008



Εικόνα 40: Μοντέλο EGM2008 για το ΚΑΔ

- Παγκόσμιο μοντέλο γεωειδούς EIGEN-6C4

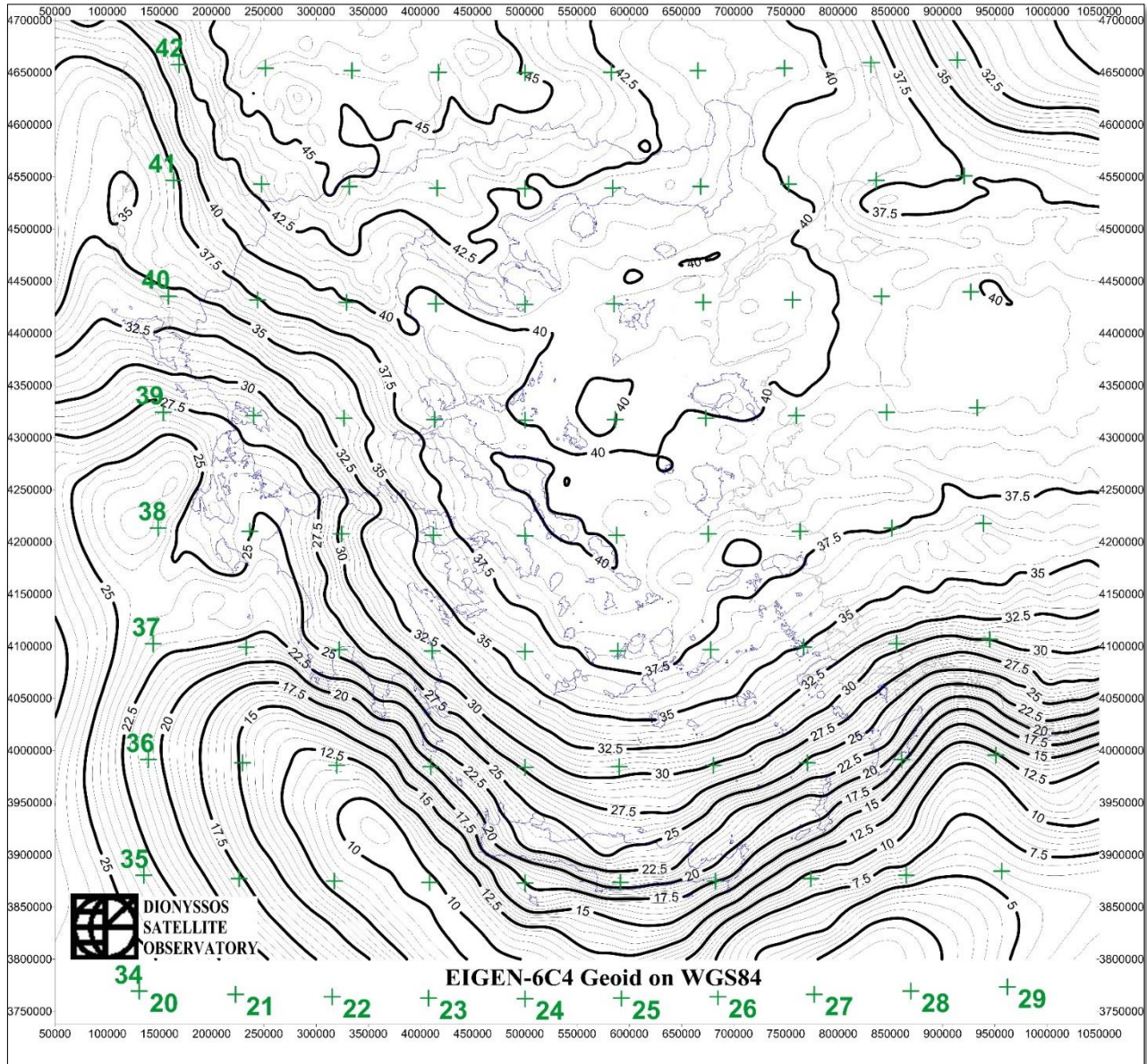


Εικόνα 41: Μοντέλο EIGEN-6C4 για το ΚΑΔ

Από τις παραπάνω απεικονίσεις γίνεται, σε πρώτο στάδιο, αντιληπτή η μη ευαισθησία των μοντέλων αυτών σε μια τόσο μικρή έκταση. Αυτό οφείλεται στην παρεμβολή προσδιορισμού των υψομέτρων του γεωειδούς (N) από ένα κάρναβο του 1'. Οι απεικονιζόμενες καμπύλες του γεωειδούς και στις τρεις περιπτώσεις δίνονται με ισοδιάσταση του 1mm, καθώς κάθε μεγαλύτερη τιμή δεν εμφανίζει αποτελέσματα για την περιοχή.

Από τα παραπάνω μοντέλα, χρησιμοποιήθηκαν τα EGM2008 και EIGEN-6C4 για την απόδοση του γεωειδούς στον Ελλαδικό χώρο, όπως αποδίδεται από τα δεδομένα της ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>: 2019):

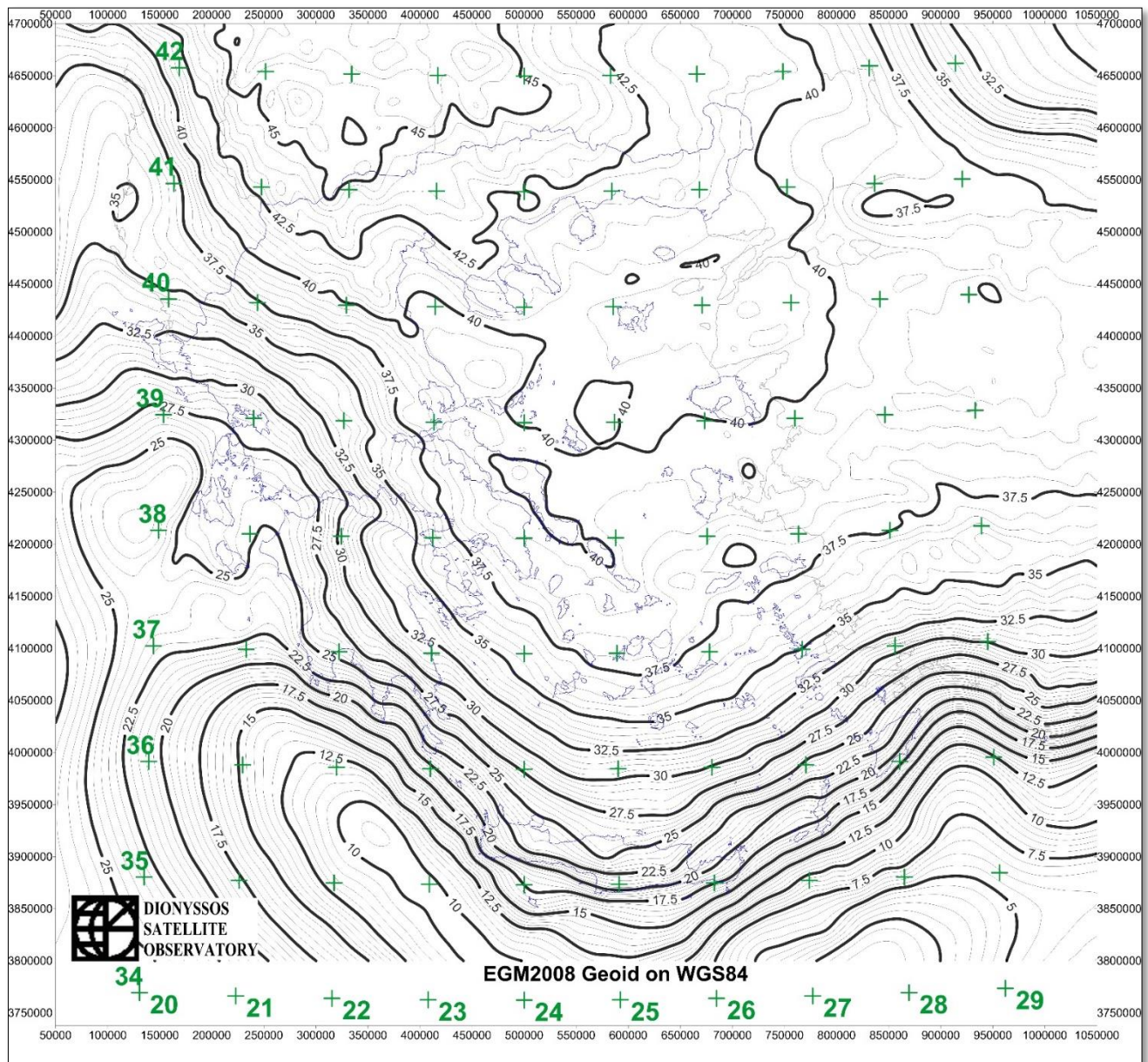
EIGEN-6C4



Εικόνα 42: Μοντέλο γεωειδούς EIGEN-6C4 για τον Ελλαδικό χώρο

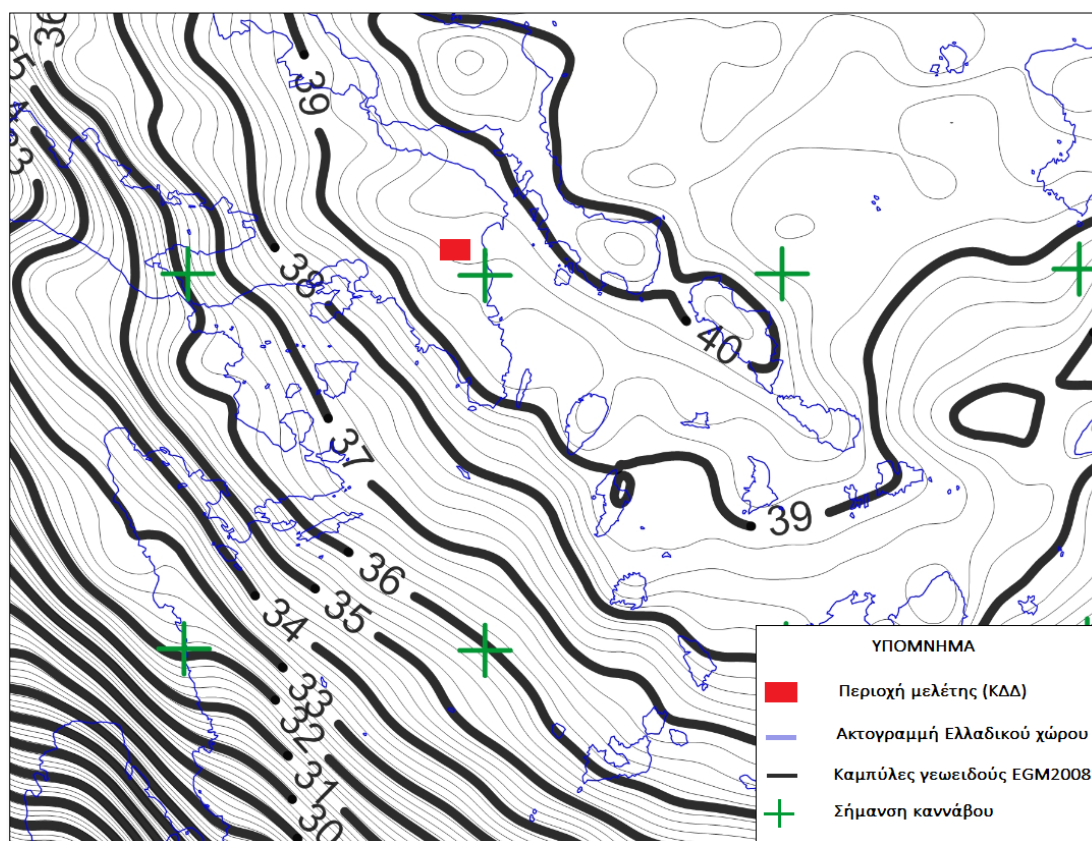
Η αντίστοιχη απεικόνιση του EGM2008 φαίνεται στην Εικ. 43.

EGM2008



Εικόνα 43: Μοντέλο γεωειδούς EGM2008 για τον Ελλαδικό χώρο

Εστιάζοντας στην περιοχή μελέτης (ΚΔΔ) η εικόνα που λαμβάνουμε είναι η εξής:



Εικόνα 44: Μοντέλο γεωειδούς EGM2008 της υπό μελέτη περιοχής

Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες (Εικ. 42 και Εικ. 43), διαπιστώνεται ότι οι κλίσεις του γεωειδούς δεν διαφέρουν σημαντικά στα δύο μοντέλα, ενώ στην ευρύτερη περιοχή του ΚΔΔ (Εικ. 44), υπάρχουν πιο ήπιες κλίσεις, σε σχέση με την υπόλοιπη Ηπειρωτική Ελλάδα που παρουσιάζονται εντονότερες και ακολουθούν την μορφή του Ελληνικού τόξου.

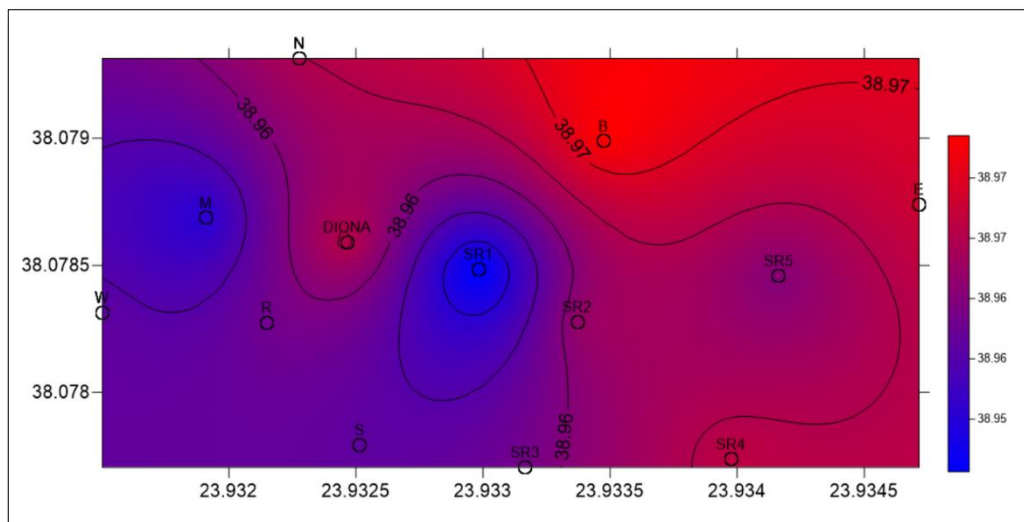
8.2 ΤΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΔΔ

Κατά το στάδιο της δημιουργίας του τοπικού μοντέλου γεωειδούς για το ΚΔΔ, λαμβάνεται υπόψη ότι εφόσον δεν υπάρχει κάποιου είδους κατευθυντήριας γραμμής που να αξιολογεί την ορθότητα ενός μοντέλου (ως προς τις κλίσεις/ως προς τη μορφή), προκειμένου να εξαχθούν οι όποιες αναπαραστάσεις και συμπεράσματα, επιλέχθηκε να θεωρηθεί ως κριτήριο η ομαλότητα των κλίσεων που παρουσιάζονται στην υπό μελέτη περιοχή.

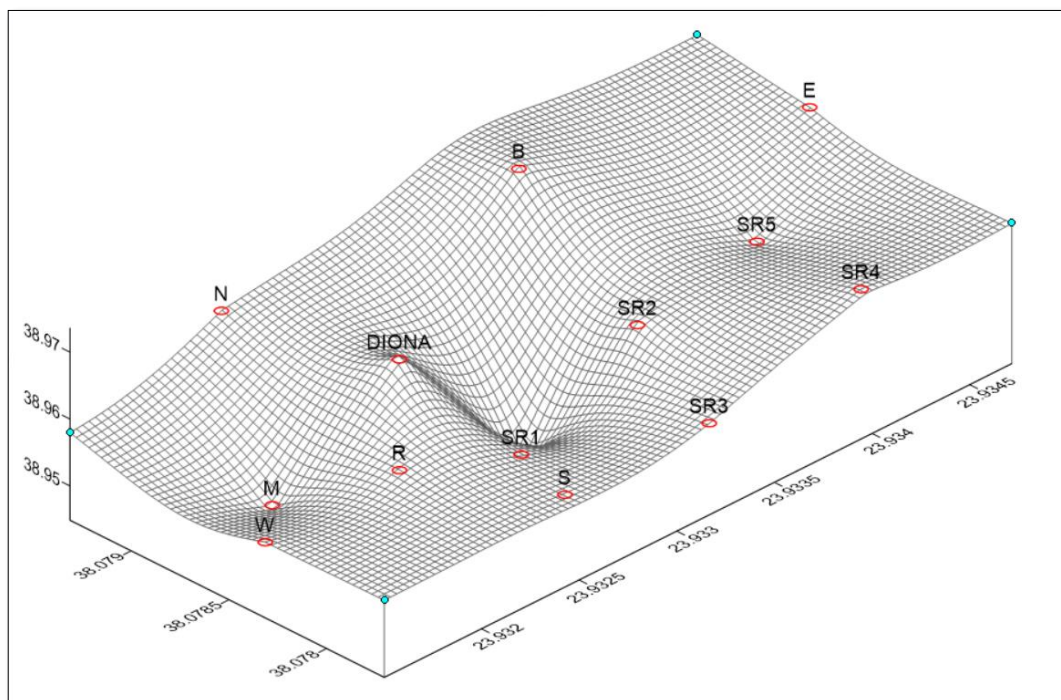
Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των υλοποιημένων μετρήσεων, προσδιορίζονται τα υψόμετρα του γεωειδούς για κάθε σημείο του εδάφους (Πιν. 16), τα οποία εισήχθησαν στη συνέχεια στο περιβάλλον του Surfer και έδωσαν την εικόνα του γεωειδούς της περιοχής που μελετάται (Εικ.45).

Πίνακας 16: Υψόμετρα γεωειδούς σημείων εδάφους

ΣΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΟΡΘΟΜΕΤΡΙΚΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ H (m)	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ h (m)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ N (m)
<i>DIONA</i>	<i>471,619</i>	<i>510,585</i>	<i>38,966</i>
SR1	468,390	507,334	38,944
SR2	462,521	501,484	38,962
SR3	458,205	497,163	38,959
SR4	452,899	491,865	38,966
SR5	455,306	494,266	38,960
E	448,847	487,815	38,968
N	461,491	500,447	38,956
W	466,749	505,705	38,956
S	458,310	497,275	38,965
R	470,204	509,162	38,958
M	469,656	508,606	38,950
B	462,990	501,964	38,974



Εικόνα 45: Τοπικό μοντέλου γεωειδούς για το ΚΑΔ

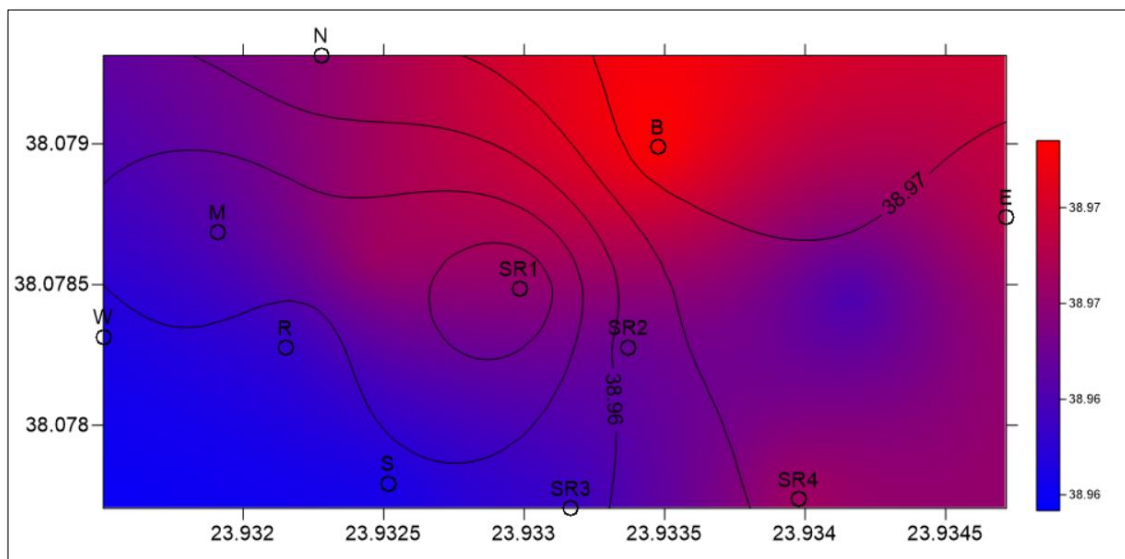


Εικόνα 46: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής

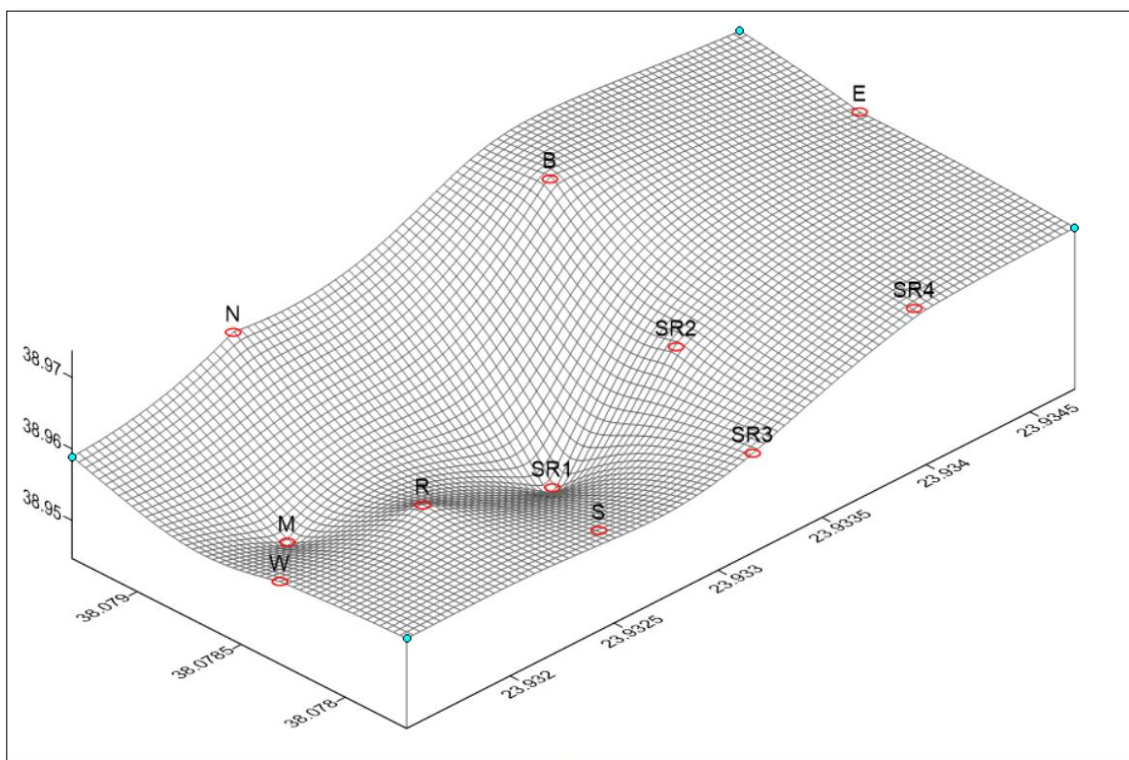
Παρατηρώντας τα απεικονιζόμενα αποτελέσματα που αφορούν την κλίση του τοπικού γεωειδούς, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχουν κάποια σημεία που δεν συμβαδίζουν με την συνολική εικόνα, παρουσιάζουν δηλαδή μια διακριτή μεταβολή (απότομες κλίσεις). Δεδομένου ότι δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την ακριβή μορφή του γεωειδούς, επιδιώχθηκε να γίνουν κάποιες δοκιμές/πειράματα, προκειμένου να δοθούν νέα αποτελέσματα και να γίνει εφικτή μία σύγκριση των διάφορων αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά οι δοκιμές αυτές αφορούν την αφαίρεση, από τους υπολογισμούς του υψομέτρου του γεωειδούς (N), κάποιων σημείων του εδάφους. Η αφαίρεση αυτή δεν έγινε άκριτα, αλλά βάσει του αρχικού αποτελέσματος και των έντονων διακυμάνσεών του, καθώς και στη γνώση της θέσης των σημείων που ιδρύθηκαν (ελαττωματικά σημεία). Συγκεκριμένα, στηριζόμενοι αρχικά στην πρώτη παράμετρο (έντονες μεταβολές κλίσης), αφαιρέθηκαν τα σημεία DIONA και SR5.

Τα αποτελέσματα της αφαίρεσης αυτής παρουσιάζονται σε επόμενη σελίδα, προκειμένου να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η μορφή των καμπύλων του γεωειδούς τόσο σε κάτοψη, όσο και στην τρισδιάστατη μορφή του.



Εικόνα 47: Τοπικό μοντέλο γεωειδούς για το ΚΔΔ, χωρίς τα σημεία DIONA και SR5



Εικόνα 48: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία DIONA και SR5

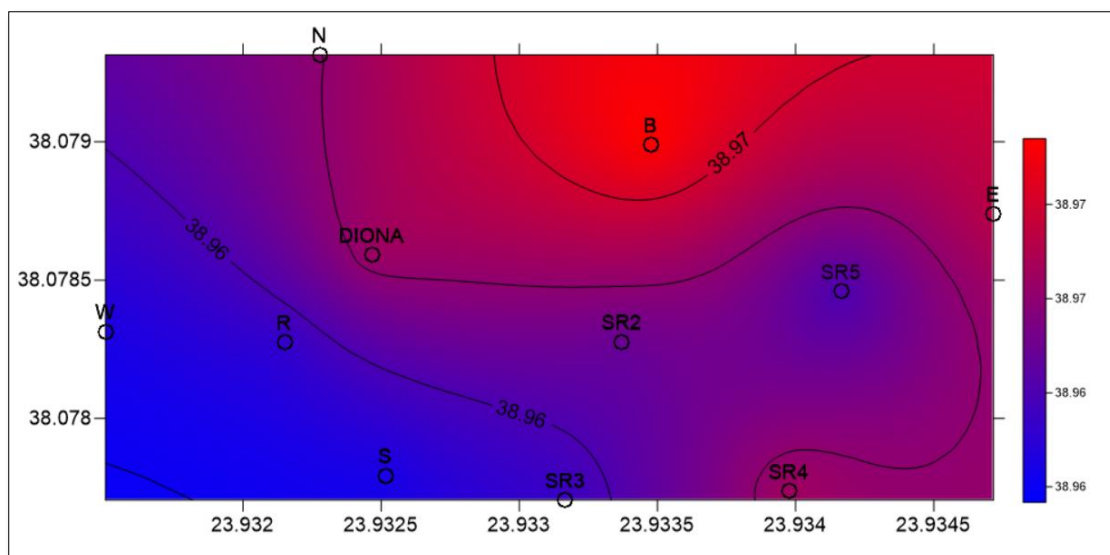
Τα νέα αποτελέσματα, παρουσιάζουν μια ομαλότερη απεικόνιση του μοντέλου. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, παρατηρείται ότι υπάρχουν σημεία που δεν συμβαδίζουν με τη συνολική εικόνα, προκαλώντας πιθανές αλλοιώσεις στην εικόνα του γεωειδούς.

Στο στάδιο αυτό εισάγεται η δεύτερη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη για την αφαίρεση σημείων από την απεικόνιση. Αναλυτικότερα, ένα εκ των 14 ιδρυθέντων σημείων και συγκεκριμένα το M, τοποθετήθηκε κατά το στάδιο της ίδρυσης του

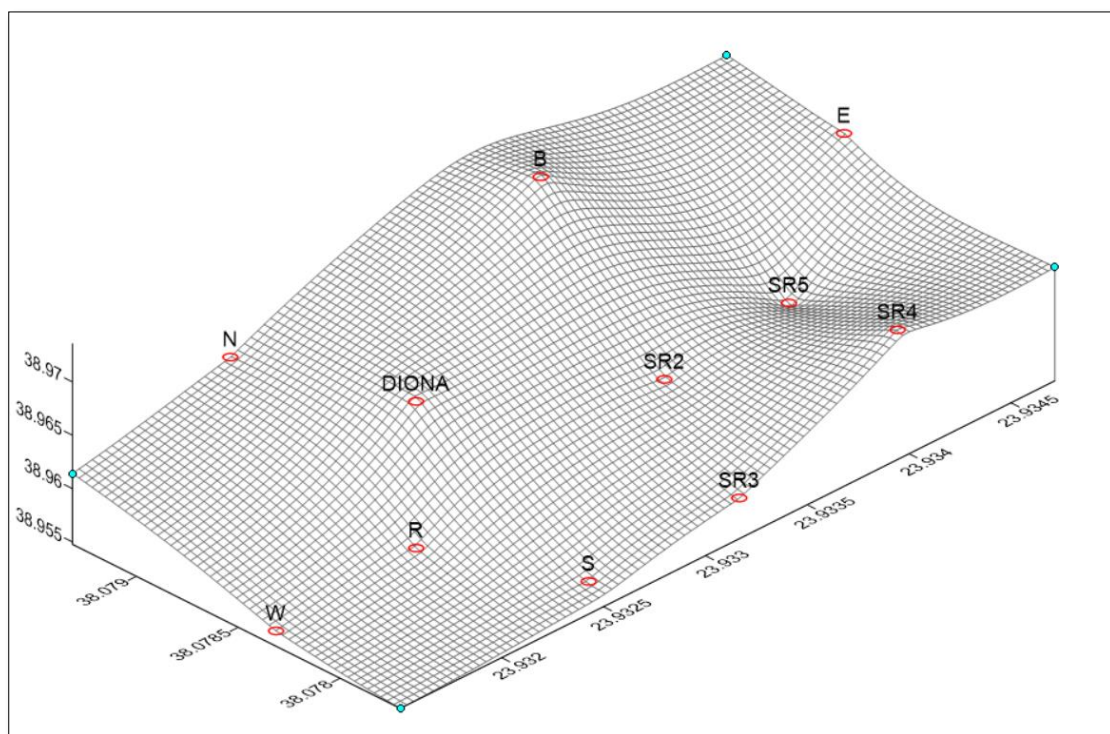
δικτύου που μελετάται, σε θέση τέτοια (βράχος) που αρχικά θεωρήθηκε μη μεταβαλλόμενη. Κατά τη διάρκεια, λοιπόν, των μηνών που πέρασαν από τη μία εργασία υπαίθρου στην άλλη, παρατηρήθηκε ότι το σημείο αυτό δεν ήταν ακλόνητο, δηλαδή παρουσίαζε μια διαφορετική συμπεριφορά. Συνεπώς, το σημείο Μ να αφαιρεθεί από την επόμενη δοκιμή.

Επιπλέον, εκτός του σημείου Μ, παρατηρείται ότι και το σημείο SR1 δημιουργεί μια ανωμαλία στη μορφή του γεωειδούς (έντονη κλίση), συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Επομένως, επιλέχθηκε να είναι το δεύτερο που θα αφαιρεθεί από τη συνολική απεικόνιση.

Τα αποτελέσματα των νέων αλλαγών απεικονίζονται στις επόμενες εικόνες (Εικ. 49 και Εικ. 50).

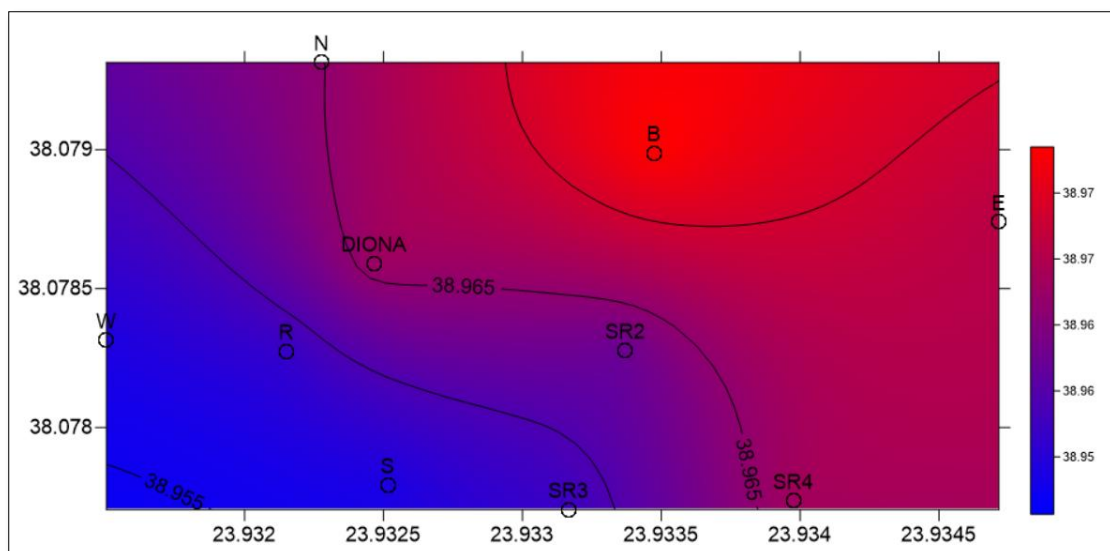


Εικόνα 49: Τοπικό μοντέλου γεωειδούς για το ΚΑΔ, χωρίς τα σημεία SR1 και M

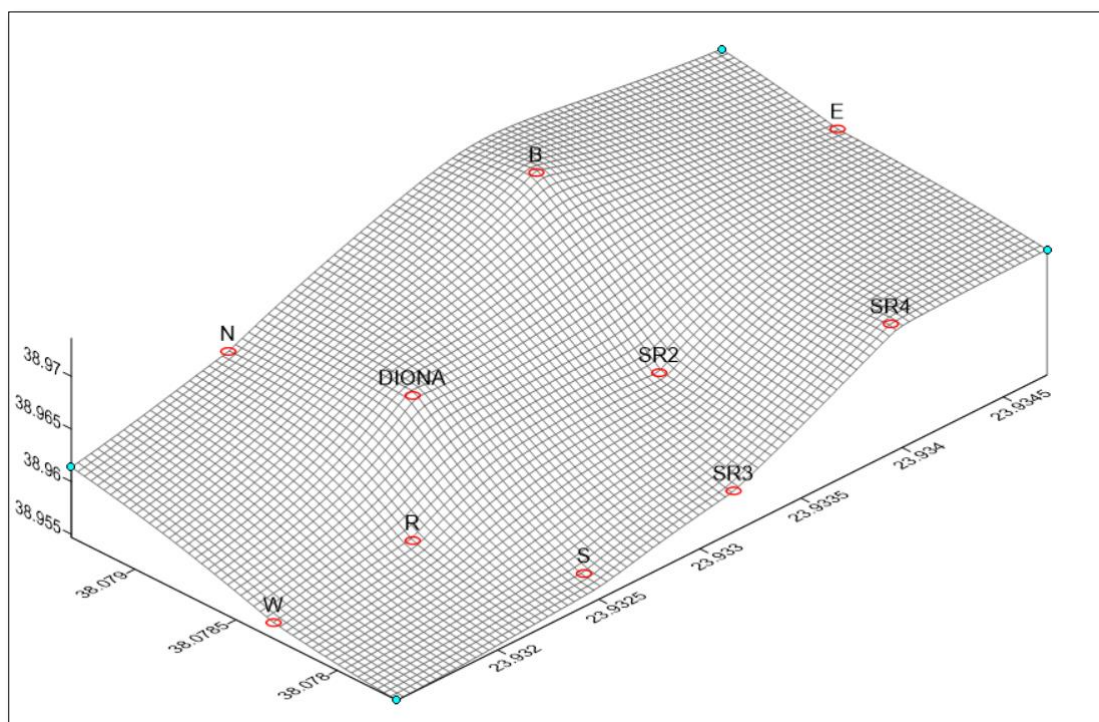


Εικόνα 50: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία SR1 και M

Η μορφή του γεωειδούς που έχει αποδοθεί στην περίπτωση αυτή, είναι η πιο ομαλή εκ των τριών. Χρησιμοποιώντας ως βάση την παρούσα αναπαράσταση, επιδιώχθηκε να αφαιρεθεί ένα επιπλέον σημείο (SR5), προκειμένου να ελεγχθεί αν θα προκύψει μια ακόμα ομαλότερη μορφή.



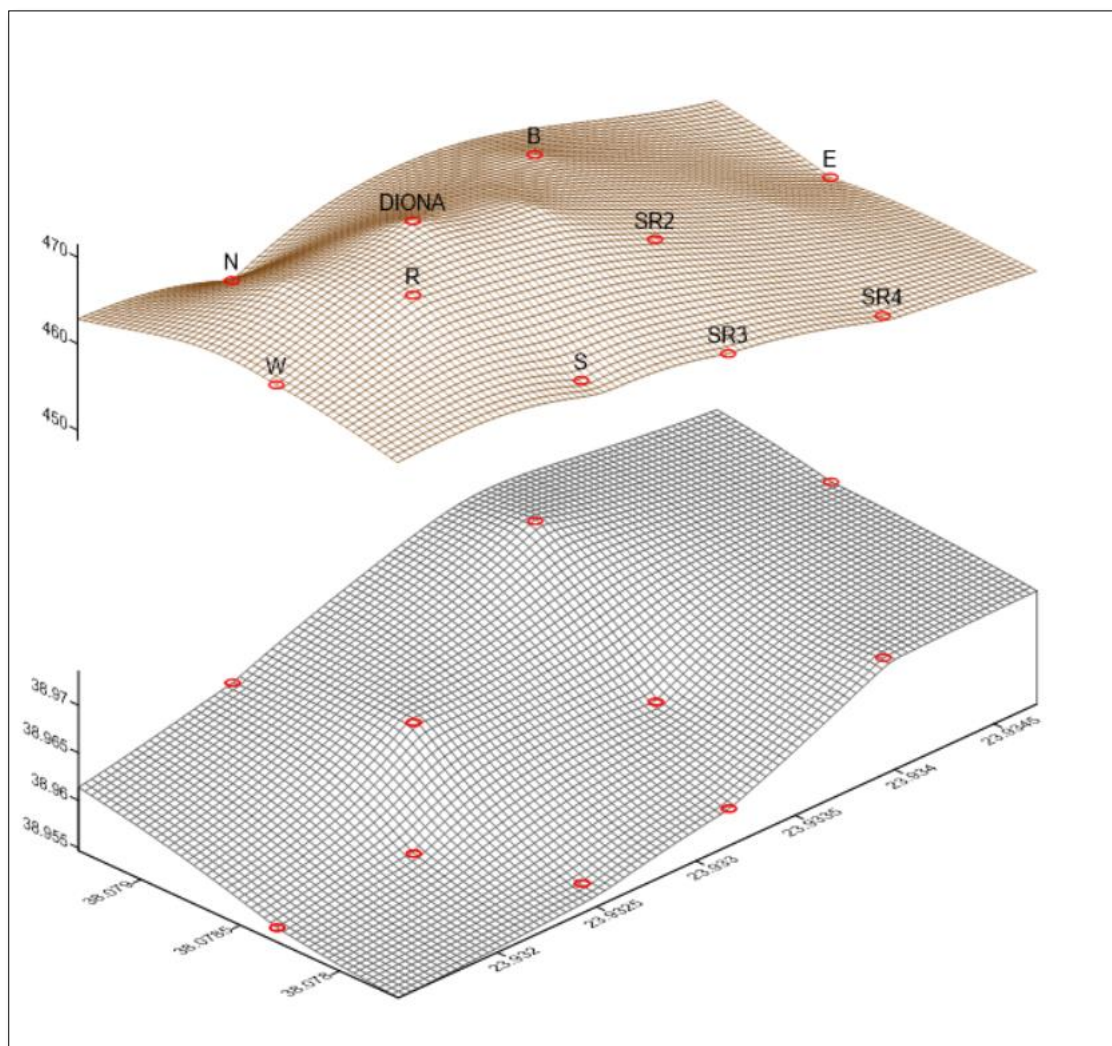
Εικόνα 51: Τοπικό μοντέλο γεωειδούς για το ΚΔΔ, χωρίς τα σημεία SR1, SR5 και M



Εικόνα 52: 3D αναπαράσταση του τοπικού μοντέλου γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής, χωρίς τα σημεία SR1, SR5 και M

Με την αφαίρεση του τρίτου σημείου, εμφανίζεται μια ομαλότερη μορφή του γεωειδούς της υπό μελέτη περιοχής. Δεδομένου ότι δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για την ορθότητα της μορφής που πρέπει να έχει το γεωειδές στην περιοχή του ΚΔΔ, επιδιώκεται να διατηρηθεί η μορφή που παρουσιάζει τη σημαντικότερη ομαλότητα, έχοντας όμως πάντα μια ικανοποιητική διασπορά των σημείων στην περιοχή.

Διατηρώντας ως ομαλότερο το μοντέλο από το οποίο απουσιάζουν τα σημεία SR1, SR5 και M, επιδιώχθηκε να γίνει μια σύγκρισή του με τη μορφή του ανάγλυφου που επικρατεί στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 53: Μοντέλο τοπογραφίας (πάνω 3D σχήμα) – Μοντέλο γεωειδούς (κάτω 3D σχήμα)

Σε μια πρώτη ανάλυση των δύο απεικονίσεων, φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ του ανάγλυφου (τοπογραφία) της περιοχής και της αντίστοιχης μορφής του γεωειδούς. Σαν εικόνες φαίνεται να μοιάζουν ως προς τις όμοιες κλίσεις, όμως με μια καλύτερη ανάλυσή τους παρατηρείται ότι δεν ταιριάζουν άμεσα.

Προκειμένου να μπορέσει να γίνει μια περισσότερο εμπειριστατωμένη σύγκριση που να αποδεικνύει την ύπαρξη ή όχι συσχέτισης των δύο αναπαραστάσεων, χρειάζεται να γίνουν περαιτέρω μετρήσεις/αναλύσεις τόσο τοπογραφίας όσο και μελέτης του γεωειδούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση όλων των διαδικασιών που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν (εργασίες υπαίθρου και γραφείου) προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τοπικό μοντέλο γεωειδούς, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα που αφορούν τόσο στις εργασίες υπαίθρου όσο και στην μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων που συγκεντρώνονται από αυτές.

9.1 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Αναφορικά με τις εργασίες υπαίθρου, συμπεραίνεται ότι για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου δικτύου ελέγχου πρέπει να πληρούνται ορισμένες προδιαγραφές:

- Η τοποθέτηση των σημείων εδάφους πρέπει να γίνεται σε θέσεις που να παρουσιάζουν μια φυσική σταθερότητα, δηλαδή να μην είναι εύκολη η κλόνησή τους, καθώς σε κάθε άλλη περίπτωση η επίλυση του δικτύου δεν θα είναι απόλυτα σωστή.
- Οι θέσεις των σημείων εδάφους θα πρέπει να καλύπτουν ομοιόμορφα την υπό μελέτη περιοχή, προκειμένου να υπάρχει επαρκής πληροφορία για το σύνολο της.
- Η τοποθέτηση των σημείων στο έδαφος θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τον περιβάλλοντα χώρο. Συγκεκριμένα χρειάζεται, αρχικά, ανοιχτός ορίζοντας προκειμένου να επιτευχθεί η απρόσκοπτη λήψη του δορυφορικού σήματος και δευτερευόντως οι επιλεγθείσες θέσεις δεν θα πρέπει να βρίσκονται κοντά σε παράγοντες που να προκαλούν μεταβολές στις μετρήσεις βαρύτητας (π.χ. κατασκευές από τσιμέντο).
- Τέλος, οι θέσεις υλοποίησης των σημείων εδάφους πρέπει να επιτρέπουν την εύκολη τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης (βαρυτόμετρο, GPS, χωροσταθμική σταδία).

9.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων, συμπεραίνονται τα εξής:

9.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ – ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ

- Σχετικά με τις μετρήσεις βαρύτητας, παρατηρήθηκε ότι διορθώνουν ελάχιστα τις μετρημένες υψομετρικές διαφορές (διόρθωση της τάξης του χιλιοστού). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή, ήταν δυνατή η παράληψη του βήματος αυτού, δεδομένης και της μικρής έκτασης της υπό μελέτης περιοχής. Όμως σε κάθε περίπτωση λόγω των άγνωστων ανωμαλιών της βαρύτητας, οι υψομετρικές μετρήσεις χρήζουν διόρθωσής της.

9.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ GPS

- Η σημαντικότερη παρατήρηση που διαπιστώθηκε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων αφορά στο σωστό προσδιορισμό του κέντρου φάσης των κεραιών που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά, κρίθηκε υποχρεωτική η χρήση των βαθμονομημένων διαστάσεων των κεραιών, που χρησιμοποιήθηκαν, από την IGS (Antenna Calibrations), καθώς παρατηρήθηκαν διαφορές με αυτές που είναι δοσμένες από τον κατασκευαστή τους (διαφορές της τάξης του εκατοστού).
- Δεδομένης της επιδίωξης υψηλής ακρίβειας στο δίκτυο (ιδίως για τα υψόμετρα) και ανεξαρτήτου του μεγέθους της υπό μελέτη περιοχής, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει συνόρθωση των μετρήσεων.

9.2.3 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ – ΓΕΩΕΙΔΕΣ

- Βάσει των μετρήσεων που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία, φαίνεται ότι η τοπογραφία της υπό μελέτη περιοχής δεν συμβαδίζει απόλυτα με το γεωειδές, γεγονός που αποδεικνύει τη μη συσχέτισή τους. Για να επαληθευθεί το συμπέρασμα αυτό, χρειάζεται μια σειρά μετρήσεων και ερευνών προκειμένου να συλλεχθεί ο απαραίτητος όγκος δεδομένων που επιτρέπει την άμεση σύγκρισή τους.

9.2.4 ΤΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ

Αναφορικά με το τοπικό μοντέλο γεωειδούς που προέκυψε ως απόρροια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σημειώνεται ότι η μέση τιμή του για την περιοχή ανέρχεται στα 38,96m. Το μοντέλο αυτό συγκρίθηκε ως προς τη μέση τιμή του με το μοντέλο γεωειδούς της Ελλάδας, στοιχεία του οποίου λήφθηκαν από το άρθρο *Calculating a geoid model for Greece using gravity and GPS observations* (Nestoras Papadopoulos, Melissinos Paraskevas, Katsafados Ioannis, Nikolaidis Georgios), καθώς και με τα παγκόσμια μοντέλα EGM96, EGM2008 και EIGEN-6C4. Αρχικά, το μοντέλο γεωειδούς που αφορά τον Ελλαδικό χώρο έχει μια μέση τιμή στα υψόμετρα του γεωειδούς (N) ίση με 38,75m, ενώ τα παγκόσμια μοντέλα για την περιοχή μελέτης δίνουν κατ'αντιστοιχία τιμές ίσες με: 39,74m, 39,69m και 39,65m.

Συνεπώς παρατηρείται ότι το υπολογισμένο τοπικό μοντέλο της περιοχής έχει υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια και βρίσκεται μεταξύ της μέσης τιμής του μοντέλου της Ελλάδας και των τριών παγκόσμιων μοντέλων, προσεγγίζοντας καλύτερα το EIGEN-6C4. Η μόνη αβεβαιότητα στο υπολογισμένο μοντέλο, έγκειται στον προσδιορισμό των ορθομετρικών υψομέτρων, καθώς λήφθηκε ως γνωστό, από παλαιότερες μετρήσεις, το υψόμετρο του σταθερού σημείου DIONA που αποτέλεσε την ορθομετρική υψομετρική αφετηρία.

Πίνακας 17: Σύγκριση τοπικού μοντέλου γεωειδούς με τα μοντέλα της ΓΥΣ, EGM96, EGM2008 και EIGEN-6C4

Μοντέλο Γεωειδούς	Μέση τιμή υψομέτρου γεωειδούς (N) σε m	Διαφορές ΔN (m) ως προς το Τοπικό μοντέλο γεωειδούς
EGM96	39,74	0,78
EGM2008	39,69	0,73
EIGEN -6C4	39,65	0,69
Μοντέλο ΓΥΣ	38,75	-0,21
Τοπικό μοντέλου	38,96	0,00

Με βάση τα όσα προηγήθηκαν συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός των τριών μεθόδων μέτρησης έδωσε ένα ικανοποιητικό μοντέλο γεωειδούς, δεδομένης της περιορισμένης έκτασης εργασιών, με ένα εύρος των $\pm 3\text{cm}$, ενώ όσον αφορά στον εντοπισμό ανωμαλιών για την περιοχή σημειώνεται ότι χρειάζεται να γίνει μία επαναληπτική σειρά αντίστοιχων μετρήσεων, ώστε να υπάρχει επαρκής όγκος δεδομένων για μελέτη και σύγκριση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ. (2010). Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Τσούλης Δ. (2005). Εισαγωγή στην Τοπογραφία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Φωτίου Α. και Λιβιεράτος Ε. (2000). Γεωμετρική ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ και Δίκτυα: Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Αριστείδης Ι. Φωτίου και Χρήστος Κ. Πικριδάς (2012). GPS και ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ: Εκδόσεις ΖΗΤΗ (2^η έκδοση)
- Αθανάσιος Α. Δερμάνης (2005): Συντεταγμένες και συστήματα αναφοράς: Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Δημήτριος Ν. Αράμπελος και Ηλίας Ν. Τζιάβος (2007): Εισαγωγή στο Πεδίο Βαρύτητας της Γης: Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- Δεληκαράογλου Δ. (2007). ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΓΗΙΝΟ ΠΕΔΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ
- Βέης. Γ, Μπιλλήρης Χ. και Παπαζήση Κ., (2005, 2006, 2007): ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας Τοπογράφων ΕΜΠ
- Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ., Μπαλοδήμος Δ.Δ. (1991): Εισαγωγή στη Γεωδαισία, Τομέας Τοπογραφίας -Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας
- Παραδείσης Δ. (2000), Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου-Τομέας Τοπογραφίας ΕΜΠ, Αθήνα
- Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ. (2009), Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι, ΣΑΤΜ-ΕΜΠ, Αθήνα
- Δρ. Παπαδόπουλος Ταξιάρχης (2008): “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ” (Σημειώσεις) . ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ –ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES (2010): ‘PRECISE GEODETIC INFRASTRUCTURE-National Requirements for a Shared Resource

Άρθρα

- Maddalena Gilardoni, Mirko Reguzzoni and Daniele Sampietro (2016): “GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008”, 60:2, pp 228–247
- Nikolaos K. Pavlis, Simon A. Holmes, Steve C. Kenyon, and John K. Factor (2012): “The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)”, 117:B4

Richard H. Rapp (1974): "The geoid: Definition and determination", Eos, Transactions American Geophysical Union, 55:3

Mark A. Richards Bradford H. Hager (1984): "Geoid anomalies in a dynamic Earth", 89:B7, pp. 5987 - 6002

Nestoras Papadopoulos, Melissinos Paraskevas, Katsafados Ioannis and Nikolaidis Georgios (2019): "Calculating a geoid model for Greece using gravity and GPS observations"

Jan Kostelecký, Jaroslav Klokocník, Blažej Bucha, Aleš Bezdek and Christoph Förste (2015): 'Evaluation of gravity field model EIGEN-6C4 by means of various functions of gravity potential, and by GNSS/levelling'

Marinou A., Anastasiou D., Papanikolaou X., Paradissis D. and Zacharis V. (2016): 'DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY AND HIGHER GEODESY LABORATORY: HISTORY AND PERSPECTIVES', Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, τόμος L, σελ. 1091-1099, Πρακτικά 14ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη,

G. Cerutti, P. De Maria, S. Desogus, A. Germak and F. Mazzoleni (1998): 'ABSOLUTE MEASUREMENT OF THE ACCELERATION DUE TO GRAVITY IN ITALY, GREECE, FRANCE AND GERMANY', Istituto di Metrologia "G. Colonnetti" – Torino, TECHNICAL REPORT R 482, pp. 2 – 13

Β.Δ. Ανδριτσάνος, Β. Καγιαδάκης, Γ. Κωστάκης, Ε. Μυλωνά-Κοτρογιάννη, Χ. Πικριδάς, Δ. Ρωσσικόπουλος, Η.Ν. Τζιάβος και Α. Φωτίου: « Προσδιορισμός Τοπικού Μοντέλου Γεωειδούς συνδυάζοντας Μετρήσεις GPS, Βαρύτητας και Υψομετρίας. Εφαρμογή στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης». Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 3 1999

Η.Ν. Τζιάβος - Γ.Σ. Βέργος, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών (2014-2015): Εισαγωγή στο Πεδίο Βαρύτητας: *Ενότητα 7: Σφαιρικές Αρμονικές Συναρτήσεις & Αναπτύγματα Συνιστωσών του Πεδίου Βαρύτητας. (Παρουσίαση).*

Βασίλης Δ. Ανδριτσάνος, Δρ. Αγρονόμος – Τοπογράφος Μηχανικός ΑΠΘ: 5^η Παρουσίαση –ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ: Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών / Τμήμα Τοπογραφίας / Τομέας Τοπογραφίας Φωτογραμμετρίας – Χαρτογραφίας.

Χ. Κωστάκης, Κ. Κατσάμπαλος και Δ.Αμπατζίδης (2008): *Χωροστάθμιση με GPS – Βασικές Αρχές, προβλήματα και προκαταρκτικά αποτελέσματα.* Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας/ Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. (Παρουσίαση).

Βασίλειος Δ. Ανδριτσάνος Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής ΤΕ Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας: Παρουσίαση 6^η: Εισαγωγή στην ανάλυση Fourier Σειρές Fourier.

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Γεωχωρικές τεχνολογίες (Εφαρμογές Ανάλυσης Σήματος στη Γεωδαισία). (Παρουσίαση).

Κοσμάς Γαζέας (2017): “ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΡΟΝΟΥ”, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Παρουσίαση).

Διπλωματικές Εργασίες

Αλεβιζάκου Ελένη –Γεωργία (2010): “ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΧΗΣ ΤΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ Ν ΣΕ ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ”

Δημήτριου Δημήτριος (2013): “ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΓΕΩΕΔΑΙΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ”

Διαμαντής Ιωάννης (2015): “ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΠΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΩΕΙΔΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ”

Μανουσάκης Πέτρος (2014): “Μέθοδοι προσδιορισμού γεωειδούς – Μελέτη περίπτωσης στην περιοχή της Κεντρικής Ελλάδος”

Διαδίκτυο

Ιστοσελίδα της IGS (τελευταία πρόσβαση 05/2019): <http://www.igs.org/>

Ιστοσελίδα της NGS (τελευταία πρόσβαση 06/2019): www.ngs.noaa.gov/

Ιστοσελίδα του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου (τελευταία πρόσβαση 04/2019): <http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/hgeod/DSO/DSOmain-en.htm>

Ιστοσελίδα της ISG (τελευταία πρόσβαση 02/2019): <http://www.isgeoid.polimi.it/>

Ιστοσελίδα της QPS (τελευταία πρόσβαση 02/2019): <https://confluence.qps.nl/qinsy/en/getting-started-35589002.html>

Ιστοσελίδα της NASA-EarthDATA (τελευταία πρόσβαση 03/2019): <https://cddis.nasa.gov/>

Ιστοσελίδα της ICGEM (τελευταία πρόσβαση 06/2019): <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>

Ιστοσελίδα του μαθήματος Δορυφορικής Γεωδαισίας (τελευταία πρόσβαση 03/2019): <http://users.ntua.gr/ddeli/satgeodesy/resources.htm>

Ιστοσελίδα του λογισμικού APSalin (τελευταία πρόσβαση 06/2019): <http://apsalin.com/home.aspx>

Ιστοσελίδα της TheFreeDictionary by Farxel (τελευταία πρόσβαση 03/2019):
<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Gravity+Field+and+Steady-State+Ocean+Circulation+Explorer>

Ιστοσελίδα της SCRINTEX (τελευταία πρόσβαση 06/2019): <https://scintrexltd.com/>

Ιστοσελίδα του The National Academies of Sciences, Engineering, Medicine
(τελευταία πρόσβαση 06/2019): <https://www.nap.edu/>

Ιστοσελίδα GeographicLib (τελευταία πρόσβαση: 04/2019):
<https://geographiclib.sourceforge.io/html/geoid.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Βαρύτητα

Πρόγραμμα Matlab για τη βαρυτομετρική διόρθωση των ορθομετρικών υψομετρικών διαφορών:

```
% Input
DH=;
Ga=;
Gb=;
Hb0=;
G45=980629.4;
% Solution
% gravity, Geodunamikos_arithmos
MGb= Gb+(0.0424*Hb0);
Cb=(MGb*(Hb0/1000))/1000;
% Mesi_timi_gravity(?g)
Mg=(Ga+Gb)/1000/2;
% Ca
% Ca=Cb-Mg;
DC=DH*Mg/1000;
Ca=Cb-DC;
% Dynamiki_diorthosi DCab
DCab= (Mg*1000-G45)*DH/G45;
% Dynamiko_H_HDa
HDa=Ca/G45*1000000;
% Diafora_dynamikwnH_DHab
DHab= DH+DCab;
% HDb
HDb = DHab +HDa
% Orthometriki_diorthosi OCab
Ha00 = Hb0-DH;
MGa=Ga +(0.0424*Ha00);
OCab = DCab + ((MGa-G45)* Ha00/G45) - ((MGb-G45)*Hb0/G45);
% DH0AB
DH0AB= DH + OCab ;
% Ha0
Ha0 = Hb0 - DH0AB;
```

Χωροστάθμιση

Πίνακας Μεταβλητότητας- Συμμεταβλητότητας (Vx) – 1^η συνόρθωση:

Vx											
1,81E-06	1,40E-06	1,03E-06	1,10E-06	1,22E-06	1,13E-06	8,93E-07	7,52E-07	8,84E-07	8,07E-07	6,11E-07	1,16E-06
1,40E-06	3,38E-06	2,29E-06	2,51E-06	2,85E-06	2,59E-06	1,87E-06	1,45E-06	1,84E-06	8,07E-07	1,02E-06	2,66E-06
1,03E-06	2,29E-06	5,25E-06	4,28E-06	3,11E-06	3,51E-06	3,96E-06	2,67E-06	2,07E-06	8,07E-07	1,39E-06	2,74E-06
1,10E-06	2,51E-06	4,28E-06	4,77E-06	3,42E-06	3,88E-06	3,29E-06	2,30E-06	2,15E-06	8,07E-07	1,32E-06	2,99E-06
1,22E-06	2,85E-06	3,11E-06	3,42E-06	4,21E-06	3,27E-06	2,47E-06	1,84E-06	2,16E-06	8,07E-07	1,20E-06	3,12E-06
1,13E-06	2,59E-06	3,51E-06	3,88E-06	3,27E-06	5,23E-06	2,77E-06	2,03E-06	2,32E-06	8,07E-07	1,29E-06	3,35E-06
8,93E-07	1,87E-06	3,96E-06	3,29E-06	2,47E-06	2,77E-06	5,30E-06	3,41E-06	1,89E-06	8,07E-07	1,53E-06	2,25E-06
7,52E-07	1,45E-06	2,67E-06	2,30E-06	1,84E-06	2,03E-06	3,41E-06	4,16E-06	1,71E-06	8,07E-07	1,67E-06	1,76E-06
8,84E-07	1,84E-06	2,07E-06	2,15E-06	2,16E-06	2,32E-06	1,89E-06	1,71E-06	3,63E-06	8,07E-07	1,54E-06	2,49E-06
8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	8,07E-07	1,61E-06	8,07E-07	8,07E-07
6,11E-07	1,02E-06	1,39E-06	1,32E-06	1,20E-06	1,29E-06	1,53E-06	1,67E-06	1,54E-06	8,07E-07	1,81E-06	1,26E-06
1,16E-06	2,66E-06	2,74E-06	2,99E-06	3,12E-06	3,35E-06	2,25E-06	1,76E-06	2,49E-06	8,07E-07	1,26E-06	3,71E-06

Πίνακας Μεταβλητότητας- Συμμεταβλητότητας (Vx) – 2η συνόρθωση, χωρίς την διαφορά ΔH_{R-M}

Vx											
3,82E-07	2,84E-07	1,98E-07	2,15E-07	2,42E-07	2,21E-07	1,65E-07	1,31E-07	1,63E-07	1,91E-07	9,80E-08	2,27E-07
2,84E-07	7,09E-07	4,95E-07	5,37E-07	6,05E-07	5,53E-07	4,12E-07	3,29E-07	4,07E-07	1,42E-07	2,45E-07	5,68E-07
1,98E-07	4,95E-07	1,14E-06	9,32E-07	6,79E-07	7,71E-07	8,84E-07	6,29E-07	4,91E-07	9,91E-08	3,73E-07	6,09E-07
2,15E-07	5,37E-07	9,32E-07	1,03E-06	7,41E-07	8,43E-07	7,38E-07	5,43E-07	5,02E-07	1,07E-07	3,48E-07	6,56E-07
2,42E-07	6,05E-07	6,79E-07	7,41E-07	8,97E-07	7,08E-07	5,55E-07	4,31E-07	4,92E-07	1,21E-07	3,08E-07	6,76E-07
2,21E-07	5,53E-07	7,71E-07	8,43E-07	7,08E-07	1,12E-06	6,27E-07	4,83E-07	5,34E-07	1,11E-07	3,39E-07	7,29E-07
1,65E-07	4,12E-07	8,84E-07	7,38E-07	5,55E-07	6,27E-07	1,18E-06	8,01E-07	4,70E-07	8,24E-08	4,23E-07	5,16E-07
1,31E-07	3,29E-07	6,29E-07	5,43E-07	4,31E-07	4,83E-07	8,01E-07	9,72E-07	4,48E-07	6,57E-08	4,74E-07	4,23E-07
1,63E-07	4,07E-07	4,91E-07	5,02E-07	4,92E-07	5,34E-07	4,70E-07	4,48E-07	8,32E-07	8,14E-08	4,27E-07	5,66E-07
1,91E-07	1,42E-07	9,91E-08	1,07E-07	1,21E-07	1,11E-07	8,24E-08	6,57E-08	8,14E-08	4,31E-07	4,90E-08	1,14E-07
9,80E-08	2,45E-07	3,73E-07	3,48E-07	3,08E-07	3,39E-07	4,23E-07	4,74E-07	4,27E-07	4,90E-08	5,24E-07	3,30E-07
2,27E-07	5,68E-07	6,09E-07	6,56E-07	6,76E-07	7,29E-07	5,16E-07	4,23E-07	5,66E-07	1,14E-07	3,30E-07	8,02E-07

Μετρήσεις GPS

Πρόγραμμα Matlab για τη συνόρθωση του 3D- δικτύου:

```
% 3D Vectors Adjustment
% Dionyssos Satellite Observatory - NTUA
% GPS Solution Vectors Adjustment
% SR# version
format long g
% Station IDs      (DYNG ID 7)
% SR1 1, SR2 2, SR3 3, SR4 4, SR5 5, E 6, S 7, W 8, N
9, R 10, M 11, B 12,
% DIONA 13, DYNG 14

% Computed Vectors IDs to form matrix A
% (from - to)
VectorsIDs = [ . . . ];

% Enter computed Vectors according to above IDs
Vectors = [ . . . ];

% Fixed Station Coordinates
DYNG = [4595220.033 2039434.147 3912625.959];

% ----- Calculations -----

% dimensions
% number of stations without DYNG
N = numel(unique(VectorsIDs)) - 1;

% number of variables
m = 3 * N;

% number of computed Vectors
n = numel(Vectors);

% Degrees of freedom
r = n - m;

% model (design) matrix,  A
A = zeros(n, m);

% Data matrix,  l
l = zeros(n, 1);

% populate matrices
% (if DYNG ID not set to "10",
% replace "10" with correct DYNG ID value at
% if, elseif, elseif below)
```

```

for i=1:size(VectorsIDs,1) % for each baseline
    for j=1:3 % for each coordinate (X, Y, Z)
        if (VectorsIDs(i, :) ~= 14) % Vector without
DYNG
            A((i-1)*3+j, (VectorsIDs(i,1)-1)*3+j) = -
1.; % from = -1 to matrix A
            A((i-1)*3+j, (VectorsIDs(i,2)-1)*3+j) =
1.; % to = 1 to matrix A
            l((i-1)*3+j, 1) = Vectors(i, j); %
Computed Baseline Vector, matrix l

            elseif (VectorsIDs(i, 1) == 14) % Vector with
DYNG as Reference
                A((i-1)*3+j, (VectorsIDs(i,2)-1)*3+j) =
1.; % to = 1 to matrix A
                l((i-1)*3+j, 1) = Vectors(i, j) +
DYNG(j); % Computed Coordinates, matrix l

            elseif (VectorsIDs(i, 2) == 14) % Vector
with DYNG as Rover
                A((i-1)*3+j, (VectorsIDs(i,1)-1)*3+j) = -
1.; % from = -1 to matrix A
                l((i-1)*3+j, 1) = Vectors(i, j) -
DYNG(j); % Computed Coordinates, matrix l
            end
        end
    end
end

% Adjustment
% X = inv(A'*A) * A * l

% X Adjusted Coordinates
% A model matrix (0,1,-1)
% l data matrix (coordinates, vectors)

% a priori covariance
V = inv(A' * A);
% Results in 3D (matrix X)
X = V * A' * l;
% Residuals
u = A * X - l;
% a posteriori sigma0
sigma0 = sqrt((u' * u) / r);
% a posteriori covariance matrix
Vx = sigma0^2 * V;

```

Έντυπα Υπαίθρου

Έντυπο βαρύτητας:

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΕΩΡΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ



Μετρήσεις βαρύτητας

Όργανο: SCINTREX CG-5 AUTOGRAV

Ημερομηνία: 14.11.2012

Παρατηρητής:

Καθώς, χωρίς, etc

Station	Time (UT)	φ	λ	h (m)	H (m)	σ (mgal)	# Rej.	ETC (mgal)	Value (mgal)
DIONYSOS AA	9:05:19					±0.057	0	-0.044	7235.082
ΣΡ8	9:19:02					±0.063	0	-0.046	7234.209
ΣΡ4	9:20:31					±0.043	0	-0.043	7236.372
N	9:22:09					±0.068	0	-0.049	7237.169
W	9:42:33					±0.039	0	-0.054	7234.966
S	9:53:13					±0.042	0	-0.053	7233.048
DIONYSOS AA	10:01:57					±0.063	0	-0.054	7234.413
ΣΡ2	10:14:40					±0.047	0	-0.055	7235.091
ΣΡ2	10:21:55					±0.051	0	-0.056	7234.192
R	10:28:44					±0.062	0	-0.057	7232.730
M	10:36:48					±0.064	0	-0.057	7232.427
DIONA	10:44:45					±0.063	0	-0.058	7232.026
ΣΡ4	10:50:43					±0.040	0	-0.058	7232.815
ΣΡ2	10:56:32					±0.056	0	-0.058	7234.204
ΣΡ5	11:03:36					±0.060	0	-0.058	7233.895
ΣΡ9	11:13:33					±0.040	0	-0.058	7235.684

Παρατηρήσεις:

120'

V

Handwritten mark



Χωροστάθμιση
Ημερομηνία :
Όργανο :

Από :
Παρατηρητής :

Προς :

ΣΗΜΕΙΟ	Αποστάσεις Μεταξύ	Όψοθεν	Μεταξύ	Έμπροσθεν	Διαφορές	Υψόμετρο
R ₁		0,658				
1		1,134		1,183	-0,525	
2		1,019		1,730	-0,596	
ΣR ₁				1,790	-0,711	
		2,177			-1,892	
ΣR ₁		1,204		0,749	1,378	
3				0,690	0,514	
R ₂					1,892	

1,892

1,892



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL of RURAL & SURVEYING ENGINEERING
DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY

GPS SITE OCCUPATION FORM

CAMPAIGN :

STATION NAME :

STATION CODE :

APPROXIMATE POSITION

Lat :

Lon :

h :

Obs Start

DATE : 16 11 2008

GPS Week :

TIME :

10:35

Obs Stop

DATE : 16 11 2008

GPS Week :

TIME :

11:17

Obs. Type :

Data Filename :

legad320

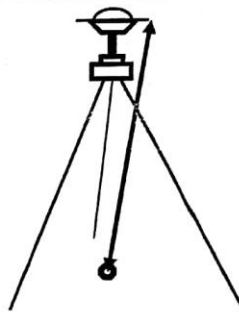
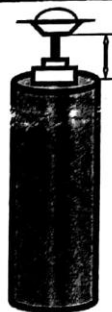
Receiver Type / Serial :

Javad legacy

Antenna Type / Serial :

Regent

ANTENNA HEIGHTS



Other

	Before	After	Before (slant)	After (slant)	Before	After
1			1.522			
2			1.522			
3			1.523			
Mean						

COMMENTS...